

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily



Obrábění dílu zhotoveného metodou 3D tisku

Machining of parts prepared by 3D printing

Autor práce: Petr Mičola, DiS.

Vedoucí práce: Ing. Radim Trojan, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student:	Petr Mičola
Studijní program:	B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor:	3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma:	Obrábění dílu zhotoveného metodou 3D tisku Machining of parts prepared by 3D printing
Jazyk vypracování:	čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky frézování
2. Popis dílu a návrh přípravku
3. Analýza vlastností tisknutého dílu
4. Technologie obrábění, volba vhodných nástrojů a parametrů obrábění
5. Obrábění a zhodnocení výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

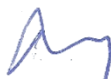
1. Produktivní obrábění kovů. Sandviken: Sandvik Coromant, c 1997, 300s.
2. KUNSTFELD, Jaroslav. Porovnání životností fréz upnutých v termoupínačích oproti jiným způsobům upínání nástrojů: Comparison of the clamping of milling cutters in thermal fixtures with other tool clamping methods : autoreferát disertační práce. Ostrava: VŠB – Technická
3. BRYCHTA, Josef. Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
4. ŠTULPA, Miloslav. CNC: programování obráběcích strojů. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
5. VLACH, B., aj. Technologie obrábění a montáží. 1. vyd. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1990. 464 s. ISBN 80-03-00143-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radim Trojan, Ph.D.

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

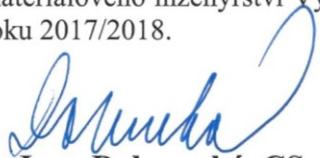
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

- Prohlašuji, že jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 – školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby. Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá frézováním světlometového rámečku připraveného technologií 3D tisku. Práce obsahuje základní úvod do technologie frézování. Popisuje obrobení přípravku pro uchycení rámečku do CNC stroje. Dále obsahuje popis programování v programu SolidCAM, volbu vhodných nástrojů a parametrů pro obrobení přípravků a rámečku. V závěru práce je uvedena charakteristika tvrdosti a drsnosti povrchu rámečku v jednotlivých fázích obrábění.

Klíčová slova

Technologie frézování, upínání nástrojů, řezné parametry, tvrdost, drsnost povrchu, upínací zařízení

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with milling of a 3D printed headlight frame. The thesis provides an introduction to milling technology. It also describes working the preparation for attaching the frame into a CNC machine. Then the thesis contains description of SolidCAM programming, selection of appropriate tools and parameters for working the preparation and the frame. The final part presents characteristics of hardness and surface roughness of the frame during various parts of the milling.

Key words

Milling technology, tool clamping, cutting parameters, hardness, surface roughness, clamping device

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Radimu Trojanovi, Ph.D. za nedocenitelnou pomoc při zpracování této bakalářské práce, jeho trpělivost a ochotu předávat své zkušenosti.

Dále patří dík také mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou a motivací.

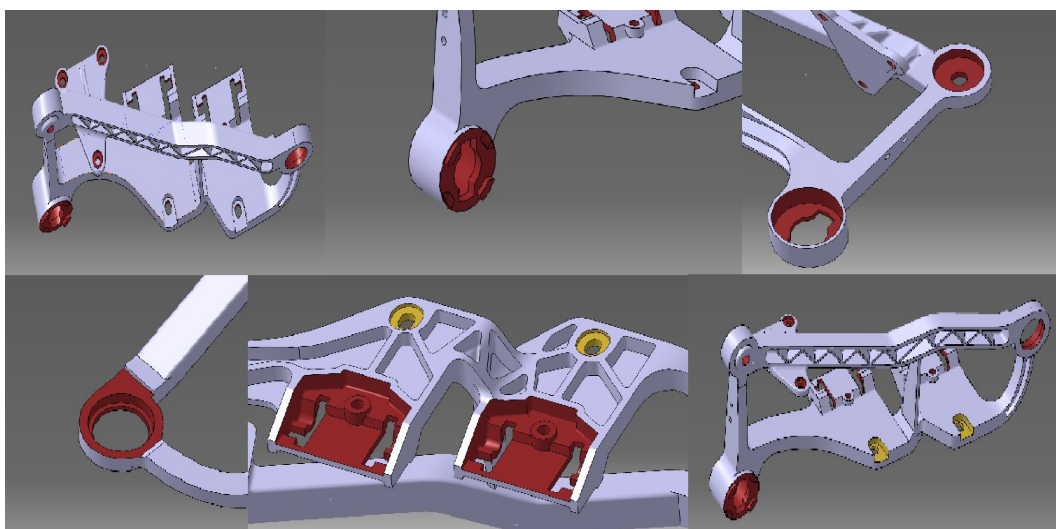
Obsah

Úvod	2
1. Úvod do problematiky frézování	3
1.1. Fréza	5
1.1.1. Dělení frézovacích nástrojů	5
1.2. Frézka	7
1.2.1. Rozdělení frézek	7
2. Popis dílu a návrh přípravků	10
2.1. Návrh upínacích přípravků	10
2.2. Výběr nástrojů a parametrů obrábění	14
2.2.1. Upínání nástrojů – tepelné upínání	15
2.2.2. Nástroje a upínače pro obrábění přípravku na upnutí rámečku světlometu....	19
2.2.3. Programová podpora pro volbu parametrů obrábění	21
2.3. Příprava CAM upínacího přípravku	22
2.4. Obrábění upínacího přípravku pro rámeček	26
3. Analýza vlastností tisknutého dílu	28
4. Měření povrchové tvrdosti pomocí tvrdoměru Krautkramer MIC 20	29
4.1. Vytvoření mapy povrchové tvrdosti	31
5. Technologie obrábění, volba vhodných nástrojů a parametrů obrábění	33
5.1. Výběr nástrojů a jejich parametrů pro obrábění rámečku světlometu	33
5.1.1. Vysokootáčkové vřeteno Jäger S62-M280.07 S5	34
5.1.2. Výměna nástrojů - rychlovřeteno	36
5.1.3. Použité nástroje a upínače	37
5.1.4. Příprava CAM rámečku světlometu	40
5.2. Obrábění rámečku světlometu a zhodnocení výsledků	42
5.2.1. Nedofrézované plochy a poškození nástrojů	44
6. Měření drsnosti	45
6.1. Měření drsnosti tisknutého rámečku před a po opracování	46
6.1.1. Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ - 411	47
7. Závěr	52
Citovaná literatura	54

Úvod

Strojní obrábění tištěných ocelových dílů je poměrně nové odvětví v oblasti obráběcích technologií. Cílem této práce je přiblížení možných metod frézování ocelových dílů připravených pomocí metody 3D tisku. V tomto směru je CNC obrábění, popř. 3D tisk s následným CNC obráběním, nezastupitelnou technologií, která přesně tyto požadavky splňuje.

Díl, Obr. 1, jehož funkční plochy byly obráběny, nebylo možno upnout přímo mezi čelisti strojního CNC svěráku. Z tohoto důvodu byly na míru zkonstruovány a zhotoveny dva přípravky pro upnutí a zafixování dílu vůči pracovnímu stolu.



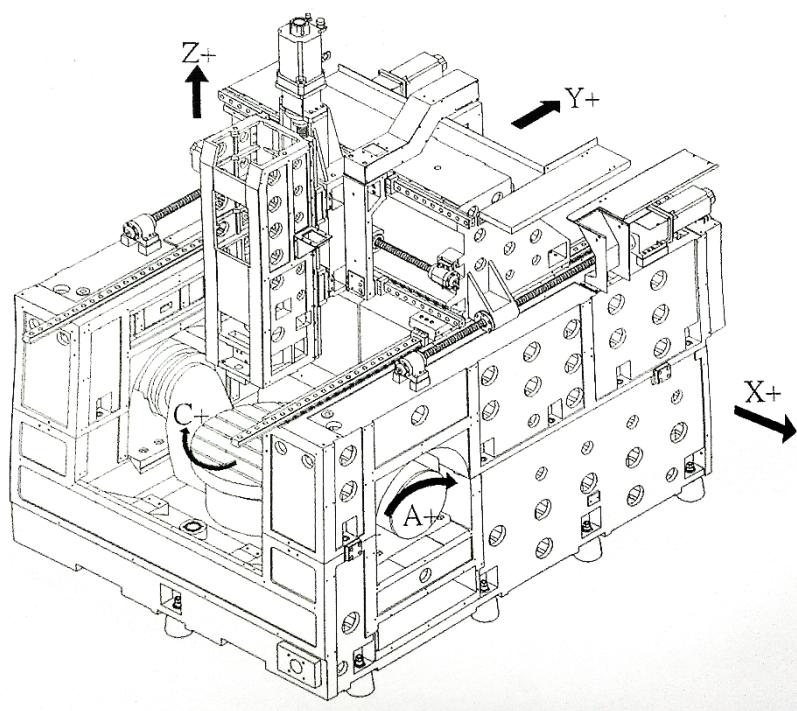
Obr. 1 Obráběné funkční plochy

Vzhledem ke složitým materiálovým a tvarovým vlastnostem obráběného dílu, bylo nutné, pečlivě zvolit obráběcí nástroje. Z důvodu stavu a povahy povrchu dílu, požadavků na jakost povrchu a přesnost obrobení, bylo jedním z klíčových faktorů vhodné zvolení řezných podmínek jednotlivých nástrojů.

Z uvedených skutečností vyplývá, že propojení dvou technologií jako je 3D tisk a jeho obrábění vyžaduje komplexní přístup, zkušenosti a pečlivost.

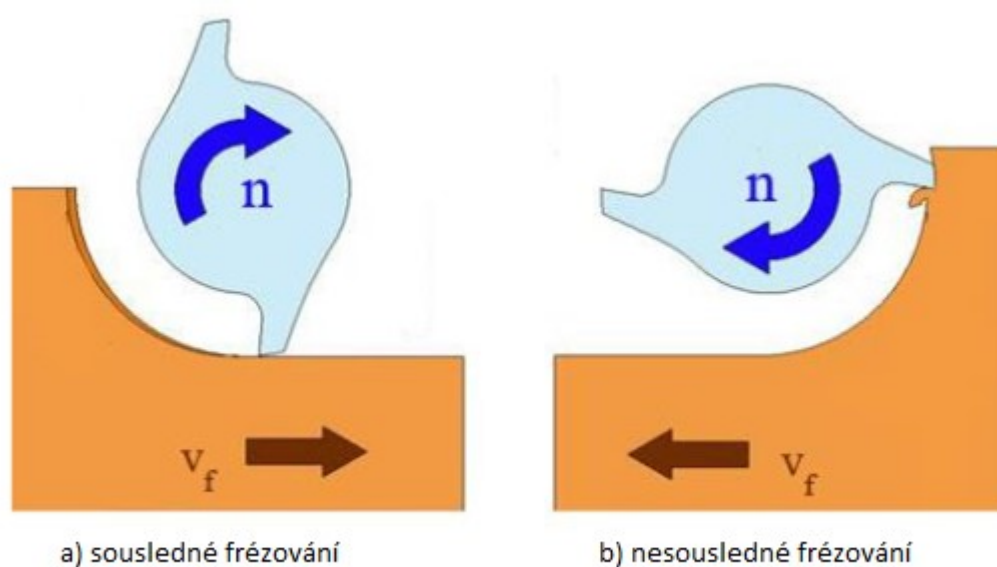
1. Úvod do problematiky frézování

Pojem frézování označuje třískové obrábění ploch, při použití nástrojů k tomu určených. Tyto nástroje mohou být v závislosti na požadavcích provedeny s jedním až několika břity. Rozlišujeme dva termíny - fréza a frézka. Termínem fréza označujeme nástroj. Naopak stroj, jímž je tato fréza uváděna do pohybu je nazýván frézkou. Frézování probíhá z pravidla v systému dvou až pěti os, viz Obr. 2. Jedním ze zásadních rozdělení frézování je jeho souslednost a nesouslednost.



Obr. 2 Příklad pěti osého stroje

Sousledné frézování je, když se směr otáčení frézy shoduje se směrem posuvu obrobku, viz Obr. 3. U nesousledného frézování je tomu naopak tzn. smysl otáčení frézy je protichůdný proti pohybu obrobku. Těchto dvou technologií bylo nutno dbát hlavně v minulosti, kdy celková tuhost soustavy, upínací stůl – obrobek – vřeteno frézky, nedosahovaly takových kvalit jako dnes. Tato tuhost je pro danou soustavu konstantní hodnotou [1]. Při sousledném frézování dochází k nárazu břitu do povrchu obrobku, tříska je odebírána od největšího průřezu k nejmenšímu, a tudíž docházelo k velkým rázům, které měly vliv na kvalitu obrobku. Navíc shoda směru přímočarého a rotačního pohybu měla za následek vtahování obrobku do obráběné oblasti a tím negativně ovlivňovala velikost třísky, viz Obr. 3. Nesouslednost frézování bývá výhodnější při hrubování a naopak sousledné frézování produkuje lepší povrch. [2]



Obr. 3 Sousledné a nesousledné obrábění [3]

1.1. Fréza

Fréza je pracovním nástrojem při procesu obrábění. Je to jeden ze základních prvků ovlivňujících celý obráběcí proces. Frézy se dělí podle celé řady kritérií: Způsob upnutí, počet pracovních břitů, povrchová úprava, použitý materiál, tvar, účel atd.

1.1.1. Dělení frézovacích nástrojů

A. Podle ploch, na nichž jsou vyrobeny břity:

- Válcové
- Čelní válcové
- Kotoučové
- Kuželové
- Úhlové
- Tvarové
- Speciální

B. Podle způsobu upínání:

- Nástrčné
- Stopkové (válcová, kuželová stopka)

C. Podle průběhu břitů:

- Přímé
- Pravořezné
- Levořezné
- Se střídavými břity

D. Podle počtu břitů:

- Jeden
- Více

E. Podle směru otáčení:

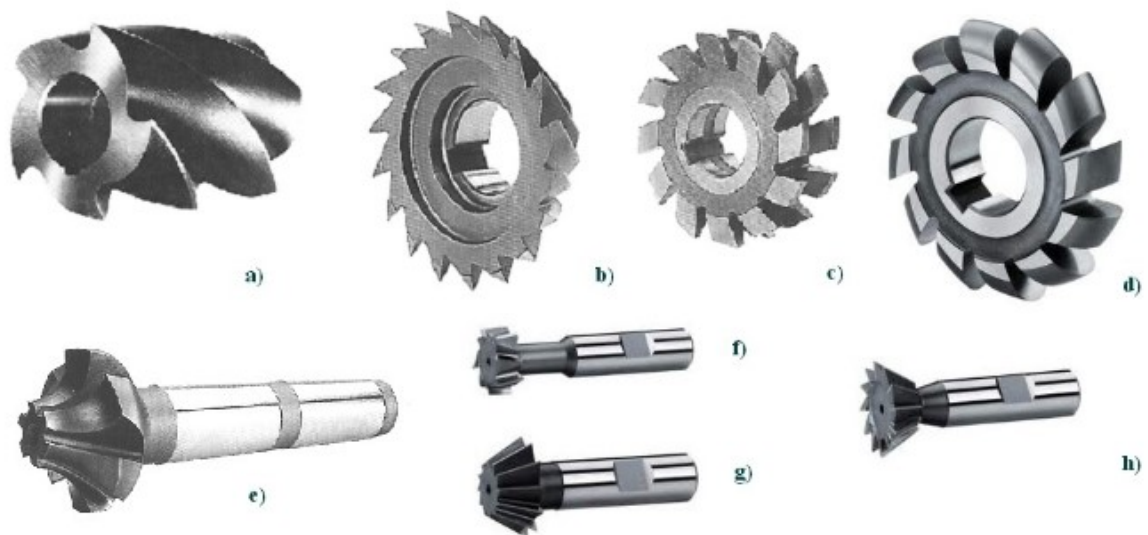
- Pravořezné
- Levořezné

F. Podle materiálu bříty:

- Rychlořezná ocel (HSS – High Speed Steel)
- Slinuté karbidy
- Tvrdokovové
- Diamantové

G. Podle počtu dílů, z nichž jsou vytvořeny:

- Celistvé
- Dělené
- Složené
- Se vsazenými nebo připájenými destičkami
- Se vsazenými segmenty břitů



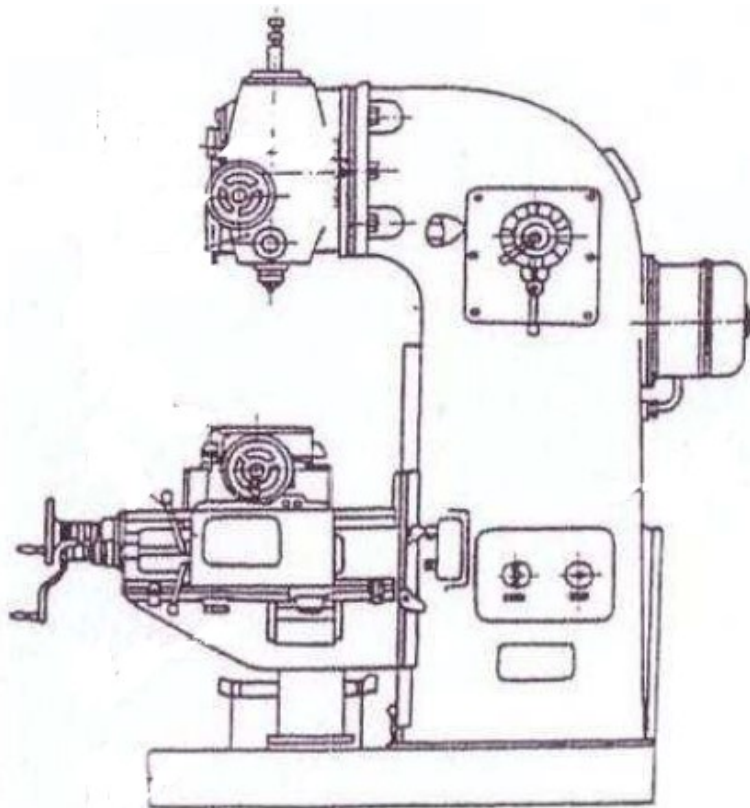
Obr. 4 Typy fréz: a) válcová fréza, b) Úhlová fréza nástrčná, c) Fréza půlkruhová vydutá, d) Fréza půlkruhová vypouklá, e) Fréza čtvrtkruhová vydutá, f) Fréza korunková s válcovou stopkou, g) Fréza úhlová jednostranná nástrčná, h) Fréza úhlová na rybinové vedení [4]

1.2. Frézka

Frézka je obráběcí stroj určený k obrábění. Pomocí frézky se obrábí rovinné, tvarové i rotační plochy a také závit.

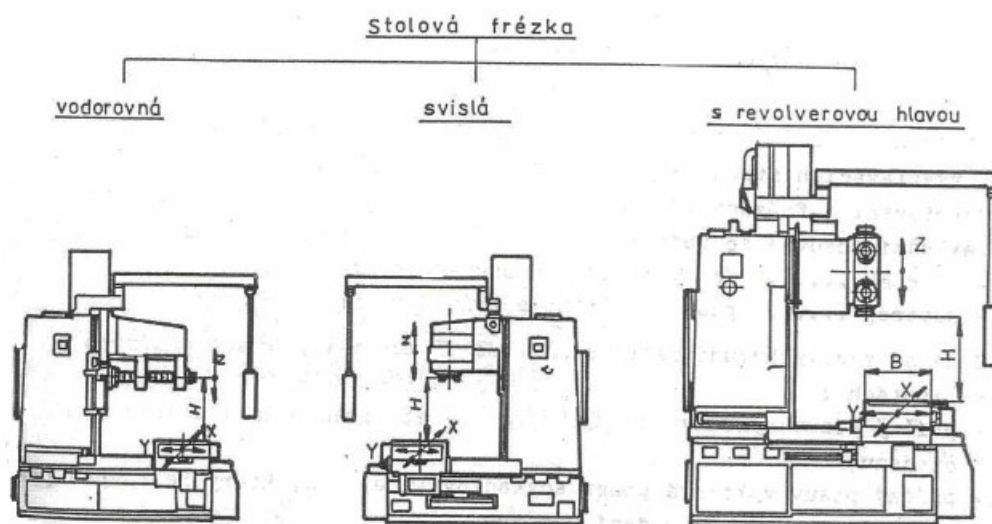
1.1.2. Rozdělení frézek

A. Konzolové frézky, viz Obr. 5 – Jejich název je odvozen od konzole, která je posuvná po stojanu. Na ní se nachází pracovní stůl pro upínání obrobku. Konzola umožňuje svislý pohyb stolu, stůl má příčný a podélný posuv. Tyto pohyby jsou zajištěny pomocí šroubů a matic, které umožňují pohyb obrobku ve třech osách. Pohon je zajištěn samostatným motorem s převodovkou a je nezávislý na otáčkách vřetena. Konzolové frézky dále rozlišujeme na vodorovné, svislé a univerzální. [5]



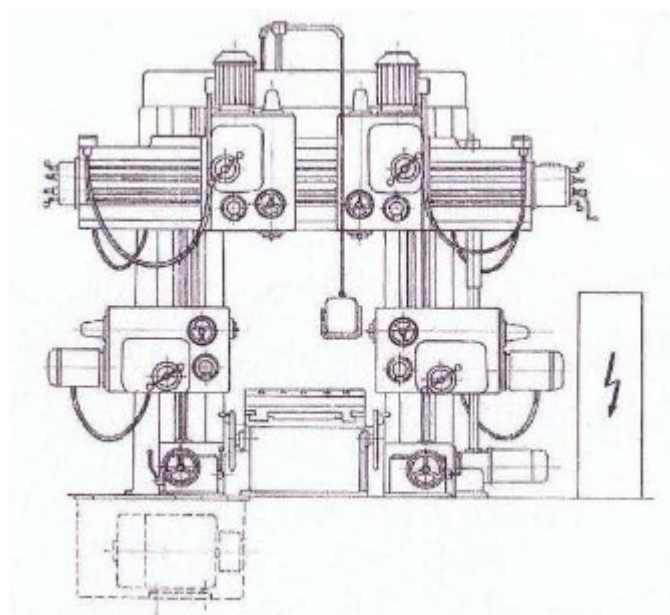
Obr. 5 Svislá konzolová frézka [5]

B. Stolové frézky, viz Obr. 6 – Jejich hlavním poznávacím znakem je příčný a podélný stůl. Nemají konzolu. Jejich výhodou je přesně definovaná a neměnná výška stolu. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním frézovacího vřetene po vedení stroje. Obvykle jsou tužší a přesnější než konzolové frézky. Většinou se používají pro výrobu rozměrnějších a těžších součástí. Jednotlivé typy jsou vodorovné, svislé a revolverové stolové frézky. [5]



Obr. 6 Přehled stolových frézek [5]

C. Rovinné frézky, viz Obr. 7 – Na rozdíl od konzolových frézek se stůl pohybuje pouze v podélném směru po pevném loži. Po svislém stojanu frézky se pomocí pohybového šroubu pohybuje vřeteník. Nástroj se pohybuje příčně vysouváním pinoly z vřeteníku. Rovinné frézky se vyrábějí s jedním vřeteníkem, nebo mohou mít druhý stojan s vřeteníkem na opačné straně stolu. Vřeteníky jsou na sobě nezávislé a mají samostatnou převodovku i motor. Na rovinných frézkách se většinou obrábějí rovinné, svislé a šikmé plochy, drážky větších součástí pomocí frézovacích hlav, čelních, kotoučových a skládaných fréz. Vyznačují se velkým výkonem a velice dobrou geometrickou přesností. [5]



Obr. 7 Rovinná portálová frézka [5]

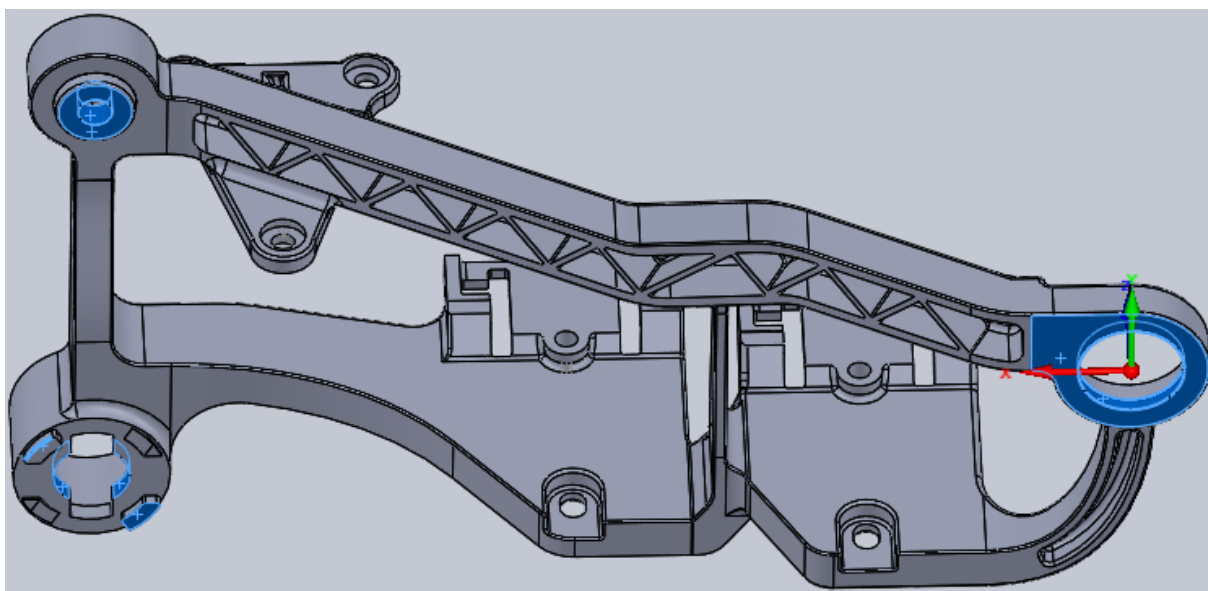
2. Popis dílu a návrh přípravků

Rámeček obráběného světloometu nedisponuje dvojicí rovnoběžných ploch pro upnutí do svěráku obráběcího centra LITZ LU-800. Tento fakt vedl k návrhu a výrobě speciálního upínacího přípravku, zkonstruovaného na míru potřebnou k bezpečnému a tuhému upnutí rámečku světloometu. Problematiku výroby upínacích přípravků lze shrnout do následující bodů:

- Návrh upínacích přípravků
- Výběr nástrojů a parametrů obrábění
- Příprava CAM upínacího přípravku
- Obrábění upínacích přípravků

1.3. Návrh upínacích přípravků

Při návrhu přípravku bylo potřeba vybrat vhodné upínací plochy, za které se propojí přípravek s rámečkem a bude možno definovat souřadný systém pro obrábění. Ideálním a prakticky jediným řešením byla trojice rovnoběžných ploch, viz Obr. 8 a Obr. 9, na které se přípravek položil a trojice kruhových otvorů, které umožnily mezi přípravkem a rámečkem přesné soustředné ustavení.

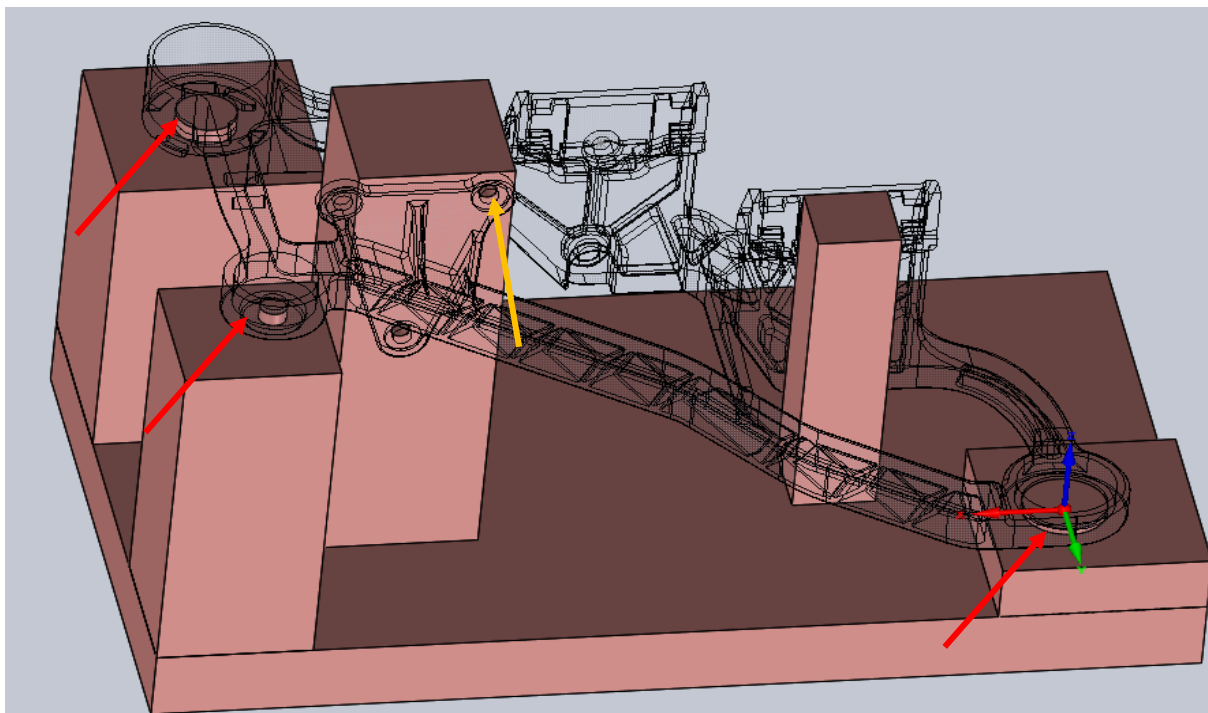


Obr. 8 Upínací a ustavovací plochy rámečku

Materiálem upínacího přípravku byla zvolena běžná konstrukční ocel S355. Mez pevnosti oceli v tahu $R_m = 470 - 630 \text{ N/mm}^2$. Tato volba byla logickým krokem z důvodu výborné svařitelnosti a dostupnosti širokého sortimentu polotovarů. V tomto případě byly použity čtvercové tyče (EN 10278) o délce hrany čtverce $a = 40; 30; 16 \text{ mm}$ a pásovina (DIN 59200) o šířce 120 mm a tloušťce 10 mm.

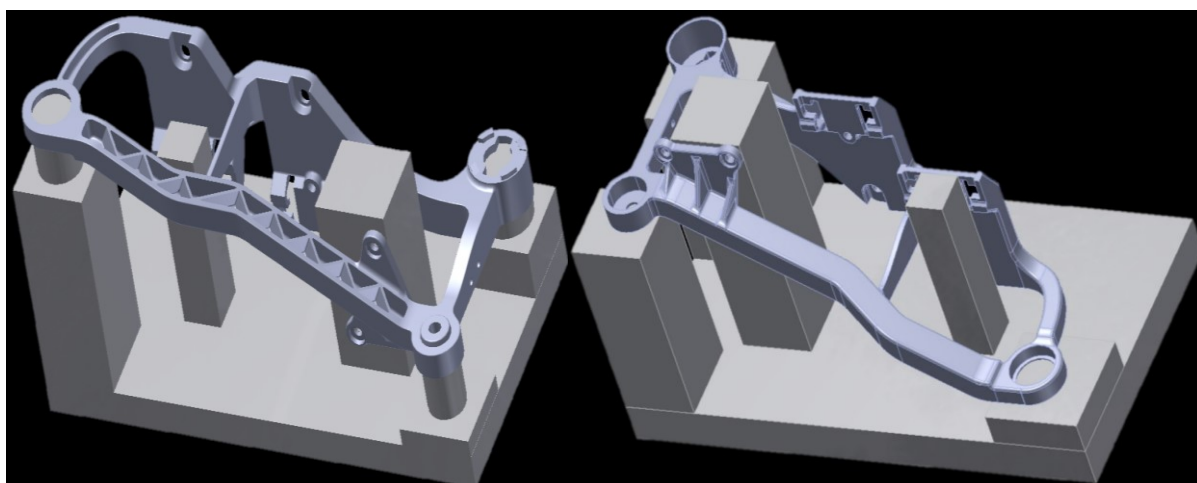
K počátku souřadného systému a zaměření polohy rámečku na obráběcím stroji se použila bezdrátová obrobková dotyková sonda Heidenhain TS 740, kterou je obráběcí stroj LITZ LU-800 vybaven. Jedná se o velice přesnou sondu s přesností $2\sigma \leq 1 \mu\text{m}$. Nulový bod, tj. počátek souřadného systému, je zobrazen na Obr. 9. Jsou to tři různobarevné šipky, jenž znázorňují orientaci jednotlivých os. Třemi červenými šipkami jsou znázorněny dosedací plochy a žlutou šipkou upevňovací bod. Tyto oblasti sloužily pro zafixování přesné polohy vůči přípravku.

Z důvodu velikosti atypické díry o průměru 3,5 mm, která byla na rámečku zkonstruována (níže na obrázku označena žlutou šipkou) a sloužila jako fixovací bod se sousední dírou v přípravku, bylo nutné použít atypický šroub M3,5 x 8 mm. Tímto šroubem se vytvořilo pevné spojení mezi tělem rámečku světloometu a přípravkem.



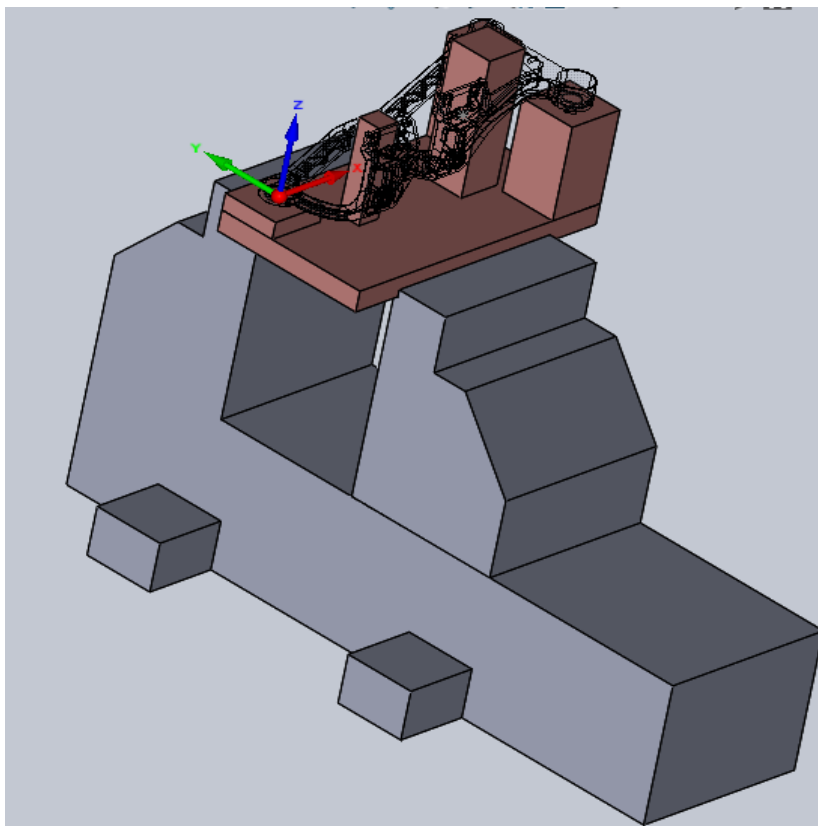
Obr. 9 Zavedení souřadného systému na rámeček světloometu

Všechny funkční plochy rámečku světlometu nebylo možno obrobit pouze jednostranným upnutím. Pro ustavení rámečku pro první fázi obrábění (1. upnutí) bylo nutno si vystačit s plochami po tisku. Kvalita povrchu vytištěného rámečku nevykazuje dobré parametry pro přesné dosednutí jednotlivých ploch. Tato komplikace byla vyřešena tak, že při prvním upnutí byly obrobena dosedací plochy, jež sloužily při upnutí druhém. Tím se docílilo přesné fixace mezi rámečkem a přípravkem a po otočení a upnutí rámečku, se obrobily i ostatní funkční plochy. Celý tento proces si tedy vyžádal tvorbu dvou upínacích přípravků, viz Obr. 10.



Obr. 10 Slícovaná dvojice přípravků pro upnutí rámečku

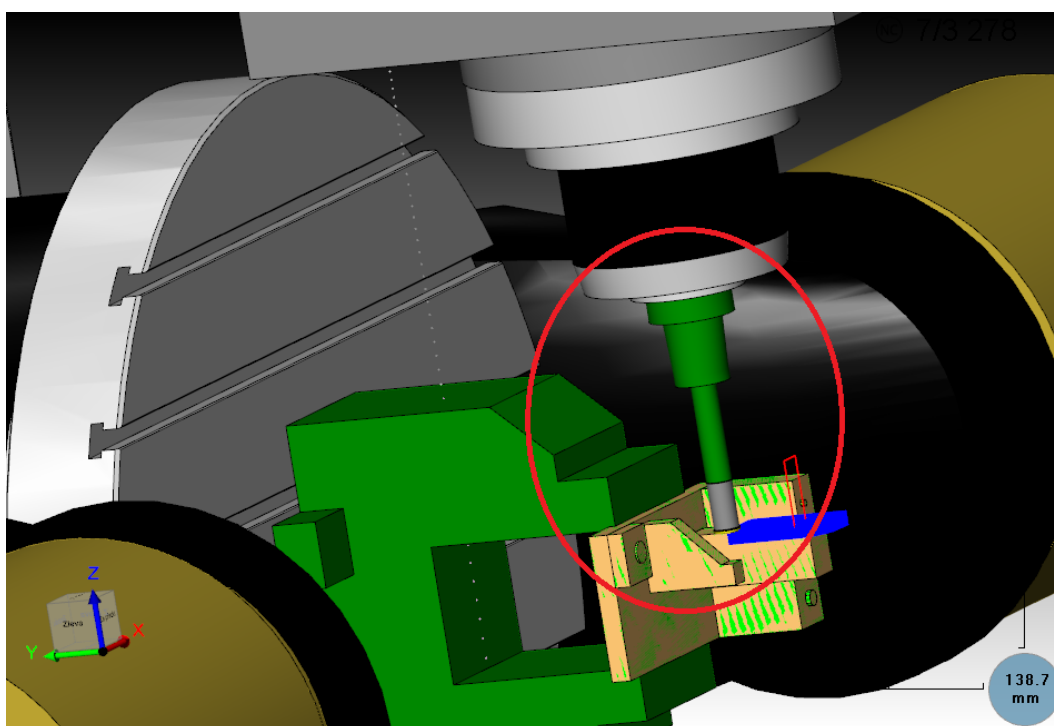
Následující Obr. 11 popisuje princip využití přípravku pro obrábění rámečků světloometu a upnutí přípravku do přesného CNC svěráku.



Obr. 11 Použití svěráku a poloha výchozího souřadného systému obrábění rámečku

1.4. Výběr nástrojů a parametrů obrábění

Zvolený materiál pro upínací přípravek rámečku světloometu, ocel S355, je materiál velice dobře obrobitelný a jeho mez pevnosti v tahu $R_m = 470 - 630 \text{ N/mm}^2$ neklade speciální požadavky na jakost obráběcích nástrojů. Problémem byla samotná konstrukce přípravku pro upnutí rámečku. Ta si vyžadovala užití dlouhých nástrojů, případně dlouhých upínačů nástrojů, aby bylo možno požadované plochy obrobit. Jak je patrné na Obr. 12, dlouhé vyložení nástroje pomohlo eliminovat možné riziko „zabourání“ držáku nástroje do strojního svěráku. Tepelné upínače se jevily jako ideální řešení pro jejich možnou variabilitu s vynikajícím poměrem mezi přesností upnutí a jejich délkou.



Obr. 12 Dlouhé vyložení nástroje

Jelikož se jednalo o přesné dokončování tištěného rámečku, byla snaha omezit počet upnutí všech dílů a tím omezit nepřesnosti obrábění způsobené přeupínáním dílů. Po zarovnání spodní plochy upínače bylo možné díky správné volbě nástrojů, využitím kompletního potenciálu 5osé frézky a použitím tepelných upínačů dosáhnout toho, že se každý z přípravků obráběl pouze na jediné upnutí. Upínací přípravek zůstal po obrobení upnutý ve strojním svěráku frézky a ihned na něj byl nainstalován rámeček světloometu. Tímto postupem se zkrátil celkový obráběcí čas a dosáhlo se větší přesnosti obrábění.

2.1.1. Upínání nástrojů – tepelné upínání

Přesné a kvalitní upnutí nástroje je kromě volby řezných podmínek a použití správného nástroje klíčovým faktorem, který ovlivňuje jakost a přesnost povrchu. Pro hrubovací operace jsou zcela dostačující kleštinové upínače. Toto upnutí není ideálně přesné, ale vzhledem k přídalkům pro další obrábění v řádu desetin mm, je zcela dostačující. Tyto upínače jsou běžně dostupné a používané.

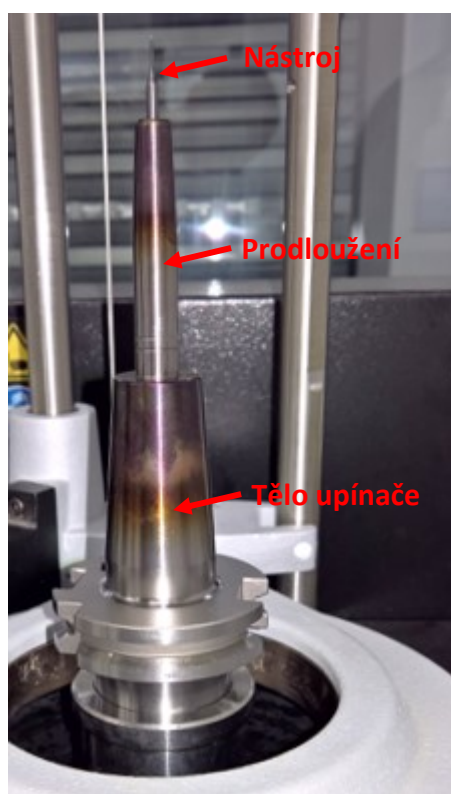
Pro přesnější a tužší upnutí se používá tepelné upnutí nástroje. Je to princip upnutí, kdy se přesně tolerovaný upínač ve speciálním zařízení indukčně zahřeje, tím se zvětší otvor určený pro vložení nástroje a přesně tolerovaná stopka nástroje (v toleranci h5, max. h6) se zasune do upínače. Po vychladnutí těla tepelného upínače, ať přirozeném nebo nuceném, se vytvoří pevný a přesný spoj. Nucené chlazení se provádí proudem vzduchu nebo kapaliny, viz Obr. 16, a zvyšuje životnost tepelně namáhaného upínače.

V tomto případě bylo použito zařízení pro tepelné upínání nástrojů ISG 3400 TWK od firmy Bilz, viz Obr. 13. Toto zařízení o výkonu 11kW, s nuceným kapalinovým chlazením, umožňuje upínat nástroje průměru stopky 3 – 32 mm, maximální délky 400 mm.



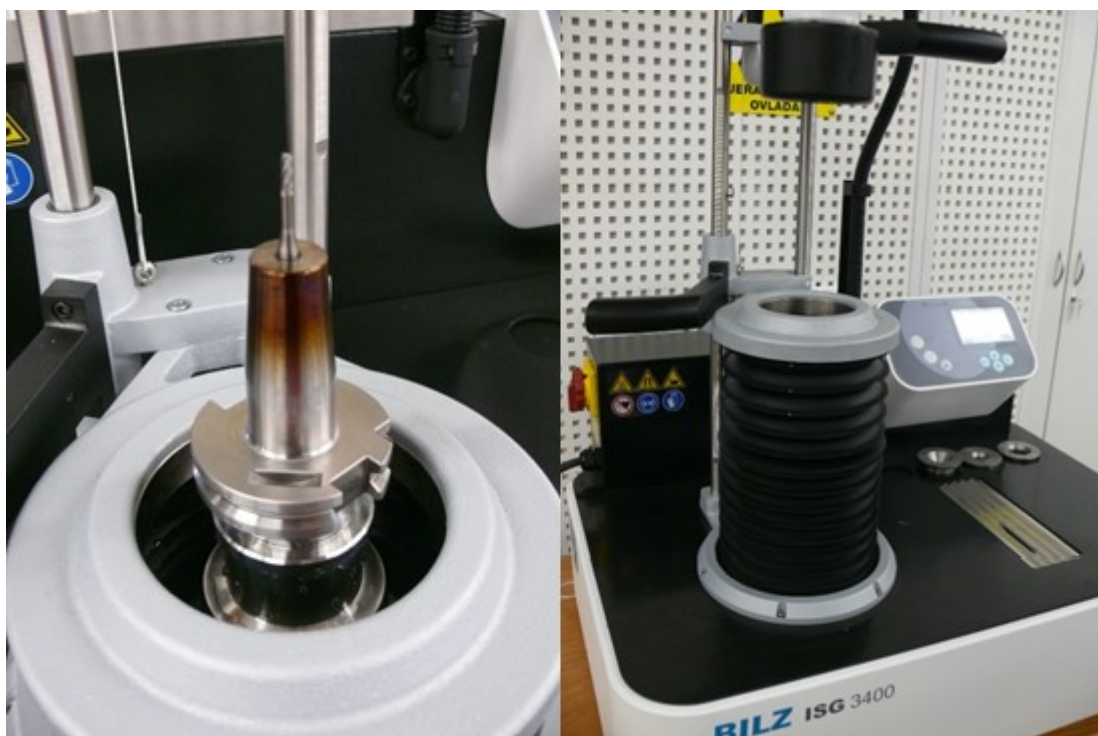
Obr. 13 Zařízení pro tepelné upínání ISG 3400 TWK

Zařízení bylo použito u nástrojů pro dokončování ploch a pro nástroje, kde bylo potřeba dlouhého a úzkého upínače. Další výhodou tepelného upínání, kromě přesnosti upnutí, jsou menší rozměry upínačů, oproti kleštinovému upínání. Toho se využívá na těžko dostupných místech, při nakloněném stole a podobně, kde by nebylo možno obrábět, nebo by se musel použít extrémně dlouhý nástroj - fréza, což by velkou měrou snížilo produktivitu obrábění a jakost obráběné plochy. Tepelné upínání nástrojů umožňuje potřebnou skladbu vyložení upínače. Mezi upínače různých délek a frézovací nástroj, je navíc možno vložit prodloužení, viz Obr. 14. Tepelných upínačů, se využívá jak při hrubovacích, tak i dokončovacích operacích.



Obr. 14 Použití tepelného prodloužení

Příklad tepelného upnutí nástroje je na Obr. 14 a Obr. 15. Duhové zbarvení těla upínače je typickým ukazatelem teplotně ovlivněné oblasti, které je zapříčiněno vysokými teplotami během indukčního ohřevu. Počet upnutí je limitován cykly zahřívání a následného prudkého ochlazení těla upínače. Těchto cyklů je možno uskutečnit jen několik set, což je plně kompenzováno přesností upnutí, rychlostí upínání nástrojů, přesností obrábění a životností nástroje díky snížení vibrací.



Obr. 15 Tepelně upnutá fréza d3, se stopkou 3 mm – vlevo, vpravo chlazení frézy



Obr. 16 Nucené chlazení tepelného upínače

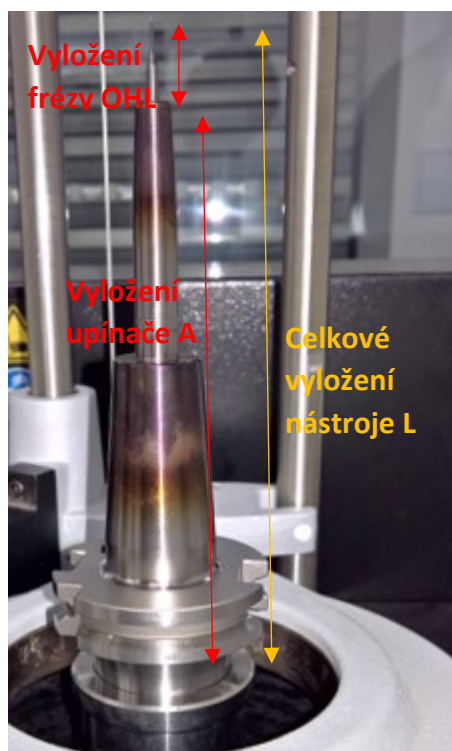
Aby bylo možno nástroj do upínače upnout a předešlo se zbytečnému přehřívání nástroje i upínače, je zařízení vybaveno přehledným menu, kde po navolení parametru nástroje a upínače, je zvolena optimální délka a intenzita ohřevu, viz Obr. 17.



Obr. 17 Grafické menu přístroje ISG 3400 TWK

2.1.2. Nástroje a upínače pro obrábění přípravku na upnutí rámečku světloometu

Jak již bylo uvedeno, jediným zásadním problémem pro volbu nástrojů na frézování přípravku byla jejich potřebná délka. Jelikož byla vyžadována vysoká přesnost obrábění a vysoká jakost povrchu byly preferovány tepelné upínače. A to jak pro hrubovací, tak i dokončovací operace. Je potřeba si uvědomit, že do délky nástroje, která ovlivňuje kvalitu a přesnost obrábění, nepatří jen vyložení nástroje (délka z upínače), ale i vyložení upínače od čela vřetene stroje, viz Obr. 18.



Obr. 18 Vyložení nástroje

V následující tabulce, Tab. 1, jsou informace o zvolených nástrojích a řezných parametrech pro frézování přípravku na upnutí rámečku světlometu. Byly použity monolitní frézy, frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD), vrták a srážec.

Tab. 1 Použití nástrojů pro přípravek na upnutí rámečku světlometu

Číslo nástroje	Použitý upínač	Použitý nástroj Břítové destičky	Počet zubů z	Posuv na zub f_z [mm/z]	Řezná rychlost v [m/min]
T8	Tepelný upínač, D8, A = 80 mm	Válcová fréza dlouhá D8 mm, Fraisa P15245400	4	0,015	60
T10	Tepelný upínač, D18, A = 80 mm Frézovací tyč D18, A = 100 mm	Trigaworx D20 mm, VBD HSC05	3	0,7	170
T11	Šroubovací upínač, D35, M16	Slotworx D42 mm, VBD HSC05	5	0,13	150
T18	Kleštinový upínač ER32, A = 60 mm	Válcová fréza dlouhá D20 mm, Fraisa 15559682	4	0,015	35
T29	Kleštinový upínač ER25, A = 100 mm	Srážec/navrtávák D8 mm, dlouhý	2	0,05	15
T30	Kleštinový upínač ER25, A = 160 mm	Vrták D2,9 mm, HSSCo8	2	0,01	18

2.1.3. Programová podpora pro volbu parametrů obrábění

Tepelné upínání nástrojů potřebuje i přesně broušené stopky nástrojů, v toleranci max. h6. Tato přesnost upnutí, je samozřejmě vhodná i pro klasické upínání v kleštině, neboť čím menší nepřesnosti vneseme do upnutí, tím lepší jakosti povrchu, přesnosti a produktivity obrábění můžeme dosáhnout. Pro monolitní nástroje byly zvoleny obráběcí nástroje od švýcarské firmy Fraisa nebo Brütsch/Rüegger. Firma Fraisa vyrábí širokou škálu nástrojů, od hrubovacích, až po mikrofrezovací s požadovanou tolerancí upínacích částí nástroje h6. Výhodou volby nástrojů této značky, byl i volně dostupný konfigurátor, který dle databáze obráběných materiálů a požadované operace, nabídne výběr možných nástrojů, kde po výběru charakteristiky nástroje (průměru, délky, povlaku) jsou doporučené řezné podmínky pro konkrétní operaci, viz Obr. 19.

The screenshot shows the 'ToolExpert - [Tool choice (expert)]' window. It features a sidebar on the left with categories: 'Milling cutter', 'Drills', and 'Indexable insert'. The main area is divided into several sections: 'Tool data' (Description: Cylindrical end mills Micro C1.5, Shank Ø 3mm, 1.5xd, Order ref. M45709030, Cutting Ø 0,30, Length 1.5xd, Coating Micro), 'Cutting data' (ae 0,30 mm, d eff 0,00 mm, ap 0,06 mm, β 0,0 °), 'Picture of the tool' (CNC Tolerance), and 'Cutting data' (n 60000 1/min, vf 432 mm/min, vc 342 m/min, fz / f 0,004 mm). There are also buttons for 'DXF', 'Print', and 'Back'. The bottom left corner displays 'www.fraisa.com'.

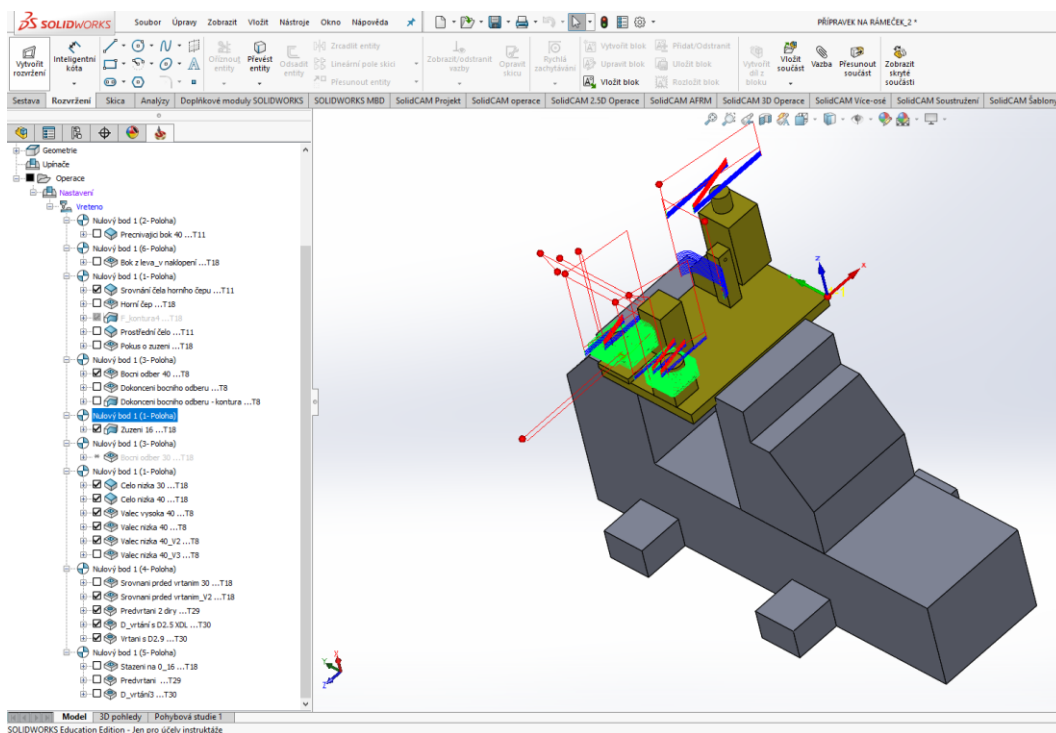
Obr. 19 Příklad výběru nástroje pro mikrofrezování

Tyto řezné parametry jsou pouze doporučené a orientační. Pro dlouhé upínače je potřeba parametry snížit, stejně jako pro otupující se nástroj. Při samotném obrábění dochází k další korekci řezných parametrů. To umožňuje řídicí panel systému Heidenhain, kde je během obrábění možné dynamicky měnit programem nastavené hodnoty posuvu F (0 - 150 %) a otáček S (5-150 %). Úprava řezných parametrů ve veliké míře závisí na zkušenostech programátora CAM a na obsluze CNC obráběcího stroje při samotném procesu obrábění.

1.5. Příprava CAM upínacího přípravku

Pro samotné obrábění, resp. tvorbu programu pro obrábění používáme CAM podporu programu SolidCAM 2017, který je nadstavbou pro konstrukční program SolidWorks. Součástí programu SolidCAM není pouze vytvoření jednotlivých operací a následné vygenerování drah pro jednotlivé operace na základě definovaných vstupních parametrů, ale umožňuje i simulovat úběr materiálu a kvalitu ploch – Solid Verify. Taktéž dokáže simulovat pohyby stroje a jednotlivých komponent – Simulace stroje.

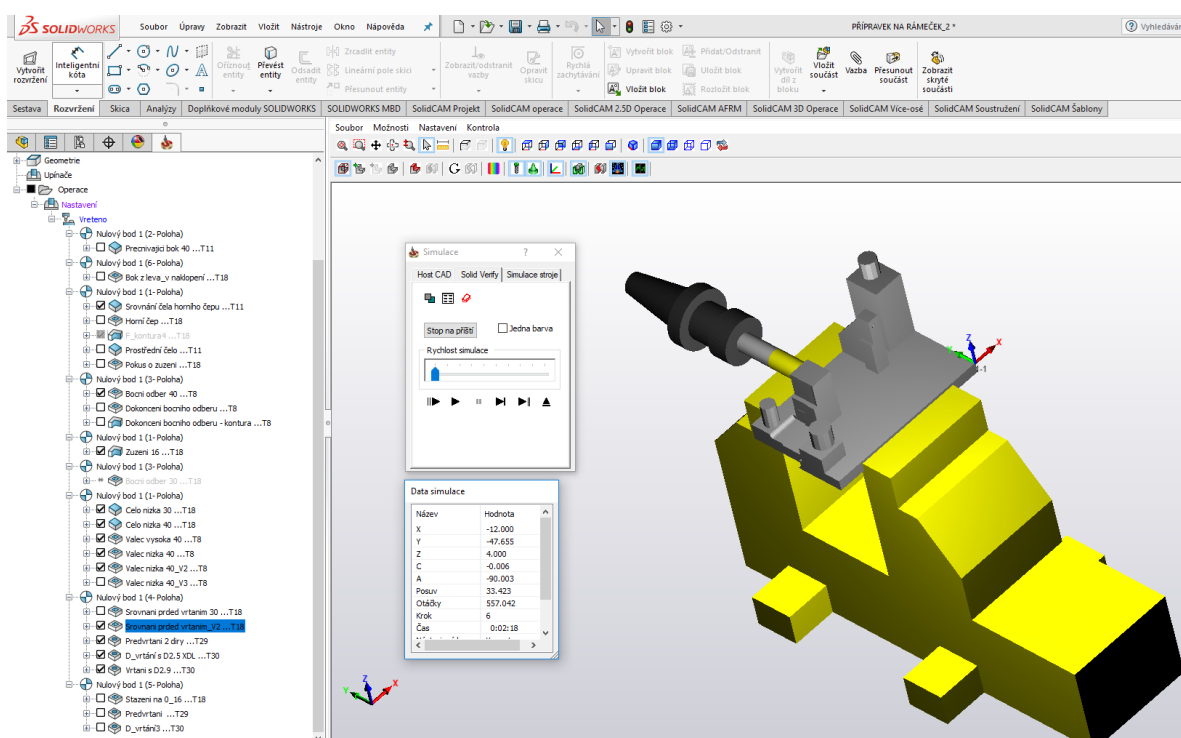
V programu SolidCAM se připravují jednotlivé operace/kroky, tak jak budou za sebou následovat při obrábění. Postupně od srovnání čel, přes hrubovací operace, až po dokončení povrchů. Dle složitosti součásti vzniká stromová struktura, příklad na Obr. 20.



Obr. 20 Příklad stromové struktury upínacího přípravku s dráhami vybraných operací

Celý program je tvořen dílčími operacemi, u kterých je potřeba definovat základní parametry jako tvar obráběné plochy, použitý nástroj, použitý upínač, hloubku třísek, nájezdy a odjezdy nástroje, kontrolovat zabourání do ostatních ploch apod. Je tedy zřejmé, že CAM podpora tvorby obráběcího programu je velice užitečný pomocník, avšak není to zcela automatický proces.

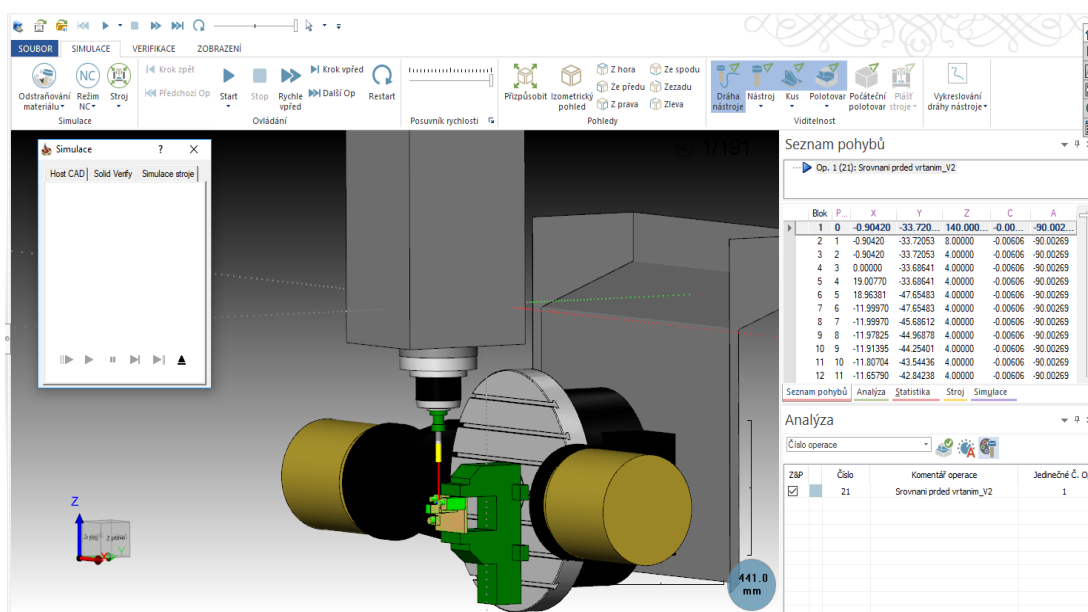
Program SolidCAM, pomocí specializovaného postprocesoru pro konkrétní stroj, na konci programování, vygeneruje dráhy nástroje v programovém NC kódu, čitelným řídicím systémem daného stroje. Aby se minimalizovaly chyby při obrábění, a následně možné kolize, poškození stroje a nástroje, disponuje program dvěma základními simulačními režimy „Solid Verify a Simulace stroje“. Plochy – tolerance obrábění byly simulovány pomocí „Solid Verify“, viz Obr. 21. Tato simulace nám zobrazuje postupný úběr materiálů, umožňuje kontrolu dráhy nástroje, a tím ověřuje přesnost obrábění, kolize s obrobkem a upínacími prvky, porovnává obráběný díl s výchozím modelem, zobrazuje časy obrábění atd. Zapnutá kontrola ploch nám barevně umí rozlišit rozdíly mezi modelem a navrženým obráběním.



Obr. 21 Příklad kontroly obrábění pomocí simulace Solid Verify

Další důležitý režim simulace je „Simulace stroje“, viz Obr. 22. Tato simulace kontroluje zejména kinematiku obrábění, od vřetena, nástroje, přes upínače a obrobek až po obráběcí stůl.

Ze simulací získáváme přehled o obráběcích časech, i když tuto informaci musíme brát s rezervou. Simulace SolidCAM pracují s teoretickými strojními posuvy. Především u víceosého obrábění a u častých změn směrů obrábění dochází řídicím systémem stroje k neustálému zrychlování a zpomalování posuvu, aby nedocházelo při obrábění k velkým rázům. Obráběcí časy se rovněž mění v závislosti se změnou parametrů F a S obsluhou. Reálné obráběcí časy bývají zpravidla delší.



Obr. 22 Příklad kontroly obrábění Simulací stroje

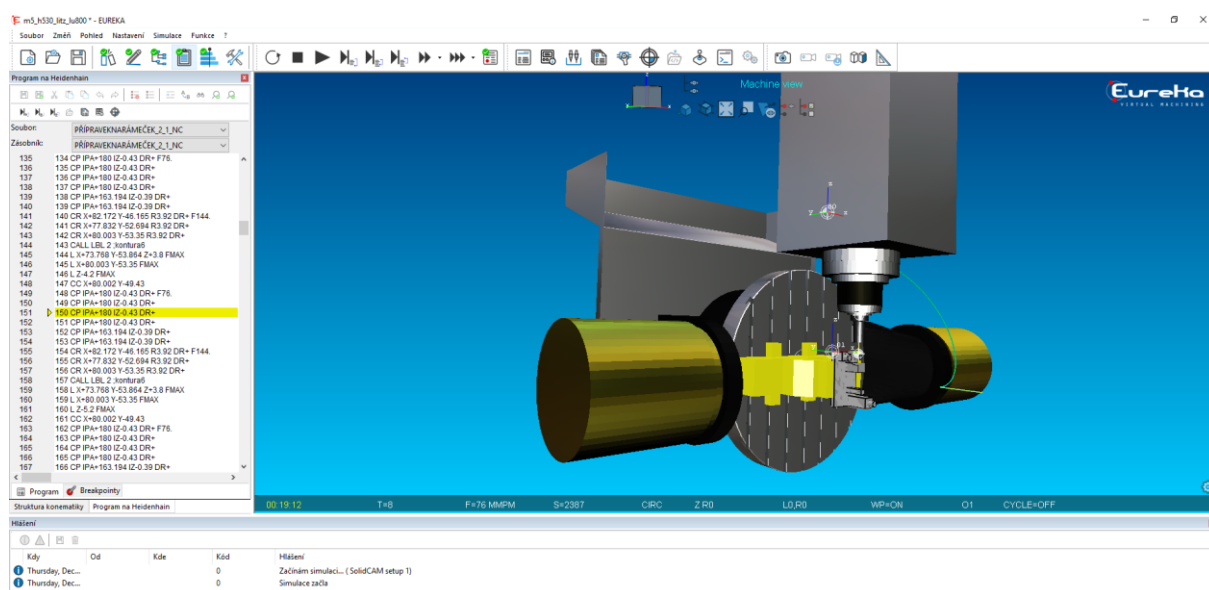
Až doposud veškeré simulace (Solid Verify a Simulace stroje) byly simulace přímo z programového prostředí SolidCAM, tedy ještě před vygenerováním, strojového NC kódu (Obr. 23). Dalším typem kontroly je simulátor Eureka 8.5., který pracuje s již vygenerovaným NC kódem pro systém stroje Heidenhain iTNC530. Takto je pokryta oblast chyb, které mohou vzniknout při generování NC kódu. Tato simulace zpřesňuje celý proces mimo jiné i tím, že kontroluje mezioperační pohyby, kolize mezi obrobkem, nástrojem, strojem a upínací. Navíc porovnává výchozí model s již obrobeným. Tento fakt je vykoupěn delšími simulačními časy a požadavkem na výkonnější hardwarové vybavení pracovní stanice. Příklad dialogového okna z programu Eureka 8.5. je na Obr. 24. V levé části vygenerovaný program se strojovým kódem, v pravé části grafická simulace na reálném modelu stroje včetně nástrojů a upínacích prvků.

```

59 CALL LBL 2 ;kontura15
60 L X+41.664 Y+46.839 Z+54.772 FMAX
61 L X+15.593 Y+46.844 FMAX
62 L Z-133.836 FMAX
63 L Z-136.086 F204.
64 CALL LBL 2 ;kontura15
65 L X+41.664 Y+46.839 Z+54.772 FMAX
66 L X+15.593 Y+46.844 FMAX
67 L Z-134.086 FMAX
68 L Z-136.336 F204.
69 CALL LBL 2 ;kontura15
70 L X+41.664 Y+46.839 Z+54.772 FMAX
71 L X+15.593 Y+46.844 FMAX
72 L Z-134.336 FMAX
73 L Z-136.586 F204.
74 CALL LBL 2 ;kontura15
75 L X+41.664 Y+46.839 Z+54.772 FMAX
76 L X+15.593 Y+46.844 FMAX
77 L Z-134.586 FMAX
78 L Z-136.836 F204.

```

Obr. 23 NC kód



Obr. 24 Příklad kontroly strojového kódu pomocí Eureka 8.5

1.6. Obrábění upínacího přípravku pro rámeček

Jak již bylo uvedeno, obrábění všech dílů pro světlomety, bylo na 5osém stroji LITZ LU-800. Tento stroj umožňuje kontinuální obrábění v 5osách, kromě klasického polohování v osách X-Y-Z disponuje dalšími 2 rotačními osami stolu A a C, viz Obr. 2. Tím je umožněno obrábění ve statických polohách, ale také kontinuální víceosé obrábění. Naklopením a uzamčením os do polohy, lze ušetřit počet přeupnutí obráběného dílu. Výsledkem je zkrácení času potřebného pro obrábění, ale také zvýšení přesnosti obrábění. Kontinuální obrábění, tedy takové, kdy dochází k neustálému pohybu všech 5 os, umožňuje obrobit nepřístupná místa složitých dílů a vyhnout se zabourání do ploch, které obrábět nechceme.

Aby bylo možno naplno využít možností 5osého řízení, je potřeba zamezit kolizi mezi vřetenem stroje, stolem stroje, upínači a obrobkem. Zde se s výhodou využilo přesného svěráku CNC Gressel Gripos 125 s vysokými čelistmi, viz např. simulace Obr. 20 a Obr. 21 nebo reálný pohled na obrábění Obr. 25. Vysoké čelisti a navržené konstrukční uspořádání přípravku umožňuje obrábění v různých polohách z boku, s rotací stolu přesahující 90°. Model svěráku, byl také součástí přípravy programu v SolidCAMu, a jeho poloha na stroji i s obrobkem byla podrobena kontrole simulacemi.

Při frézování upínacích přípravků pro rámeček světlometu byly použity, nástroje a upínače viz kapitola „2.1.2 Nástroje a upínače pro obrábění přípravku na upnutí rámečku světlometu.“



Obr. 25 Příklad obráběcí operace frézou Trigaworx v tepelném upínací s naklopeným stolem

Při obrábění byla používána chladicí emulze Fusch ECOCool R-TN 2525-HP, která zlepšuje proces obrábění, jakost obráběné plochy a prodlužuje životnost nástrojů. Tlak kapaliny 20 bar napomáhá efektivnímu odstraňování třísky z povrchu obrobku, a to i v případě frézování hlubokých kapes nebo tenkých drážek.

3. Analýza vlastností tisknutého dílu

Materiálem pro rámeček, vyrobený technologií 3D tisku, byla zvolena vytvrditelná žárupevná ocel EOS Maraging Steel MS1 (X3NiCoMoTi 18-9-5) [6]. Jedná se o velice pevnou ocel, která po zakalení a následném tepelném zpracování (vytvrzení) dosahuje tvrdosti přes 50 HRC a pevností přesahující $R_m = 2000$ MPa [7]. Ačkoli, lze tuto slitinu obrábět i ve vytvrzeném stavu, v tomto případě, z důvodu snazší obrobiteľnosti, měla být tvrdost, žíháním po tisku, snížena na cca 35 HRC. Chemické složení a základní tabulkové mechanické vlastnosti EOS MaragingSteel MS1 tisknuté z kovového prášku jsou uvedeny v Tab. 2 a Tab 3.

Tab. 2 Chemické složení oceli EOS MaragingSteel MS1 [6]

Legující prvek	Fe	C	Ni	Co	Mo	S	P	Al	Cr, Cu	Mn, Si
% množství leg. prvku	zbytek	< 0,03	17 – 19	8.5 – 9.5	4.5 – 5.2	<0,01	<0,01	0,05 – 0,15	< 0,5	< 0,1

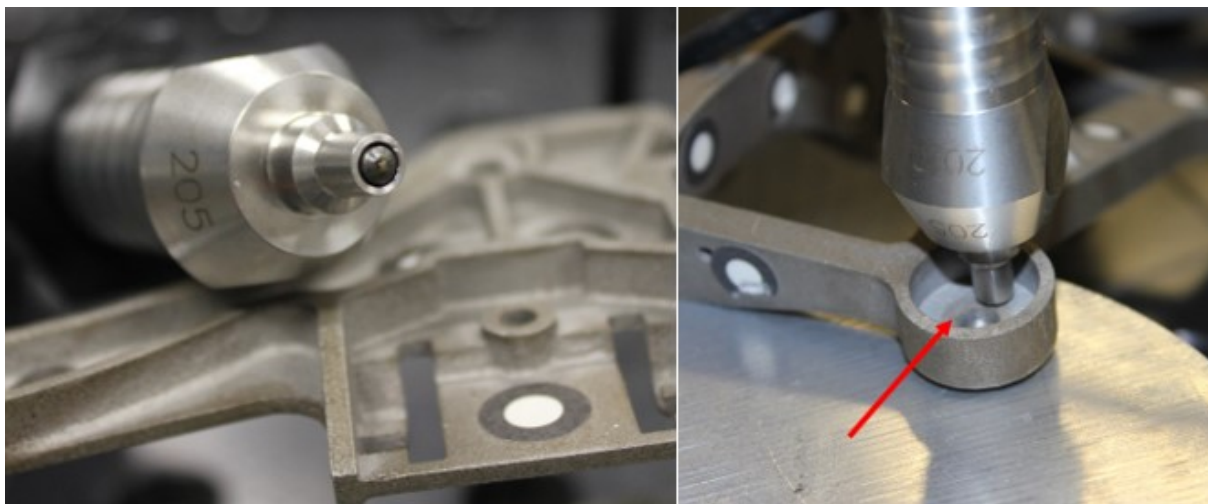
Tab. 3 Základní mechanické vlastnosti nevytvrzené oceli EOS MaragingSteel MS1 při teplotě 20°C [6]

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost [%]	Tvrdost HRC
Ve směru XY 1200±100	Ve směru XY 1100±100	12±4	33-37
Ve směru Z 1100±150	Ve směru Z 930±150		

4. Měření povrchové tvrdosti pomocí tvrdoměru

Krautkramer MIC 20

Pro ověření tvrdosti tisknutého rámečku byl zvolen přenosný tvrdoměr Krautkramer MIC 20 (se sondou s diamantovým hrotem se zatížením 98 N), který navíc umožňuje převod jednotek HV, HB, HRC a Rm, aj. Pohled na měření, měřicí sondy a přístroj Krautkramer MIC 20 je na Obr. 26 a Obr. 27.



Obr. 26 Měření tvrdosti tvrdoměrem Krautkramer MIC 20

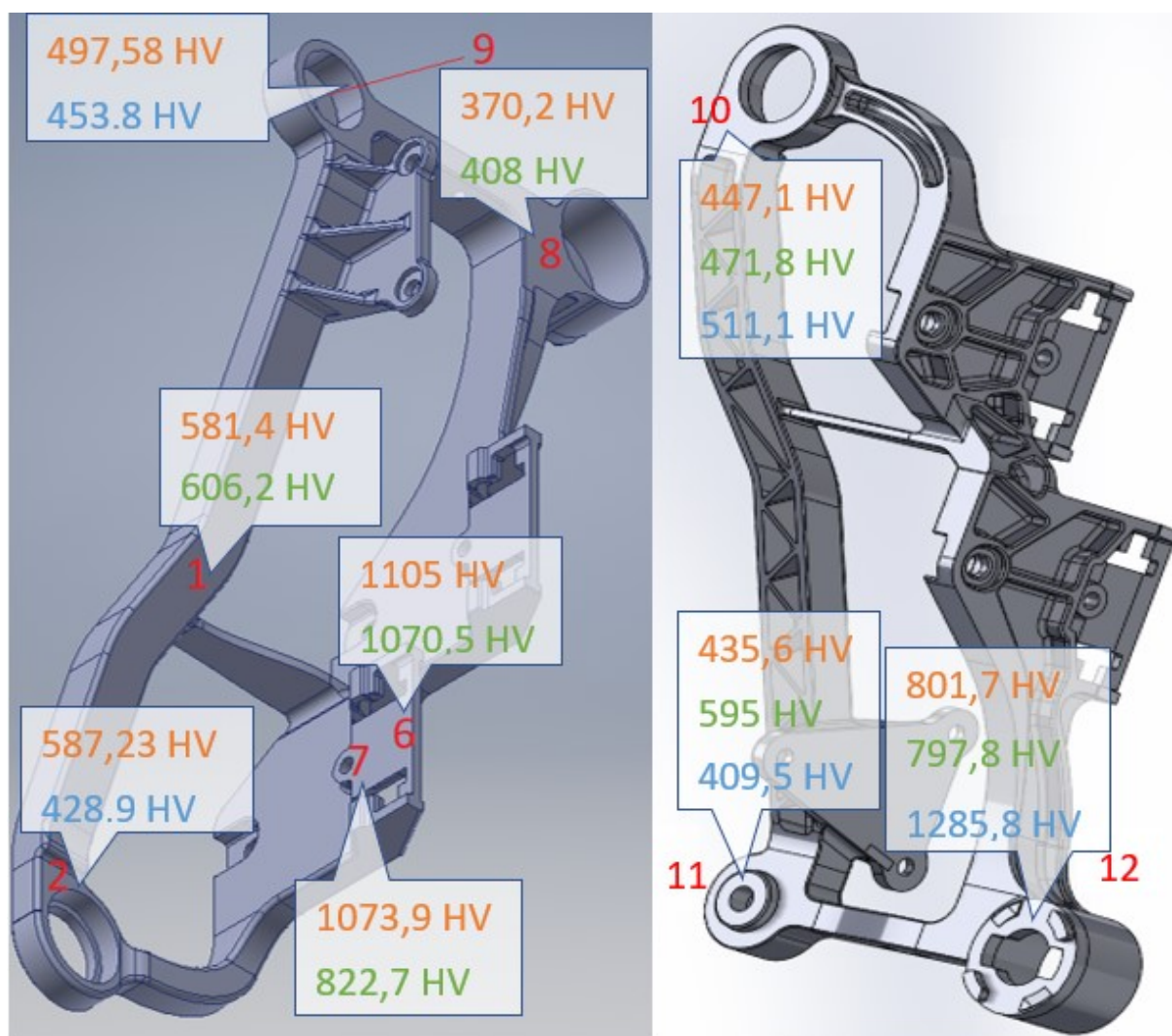
Pomocí sondy se zatížením 98 N byla změřena tvrdost povrchové vrstvy, která byla obráběna na vybraných plochách. Naměřená tvrdost značně kolísala, pohybovala se v rozmezí 305 - 593HV, což odpovídá přibližně 32-55 HRC, resp. pevnosti obráběného povrchu Rm až 1700 MPa. Deklarovaná tvrdost oceli EOS MaragingSteel MS1 měla být 35 HRC. Tento velký rozptyl tvrdosti byl připisován velké tvrdosti na povrchu vlivem oxidace, vzniklé při tepelném zpracování rámečku světla, rychlém ochlazení tenké povrchové vrstvy, popř. nehomogenitou materiálu rámečku. Hluběji v materiálu byl předpoklad tvrdosti mnohem nižší. Avšak při dokončování, se obrábí právě tato tenká a velmi tvrdá povrchová vrstva. Proto bylo potřeba vybrat nástroje, které se nezničí i při tvrdostech nad 55 HRC. Následující Obr. 27 popisuje příklady z měření tvrdosti a jejich přepočet na pevnost dle normy DIN 50150. Z grafu na měřicím přístroji je patrný velký rozptyl naměřených hodnot po ploše dna kapsy, označenou červenou šipkou na Obr. 26.



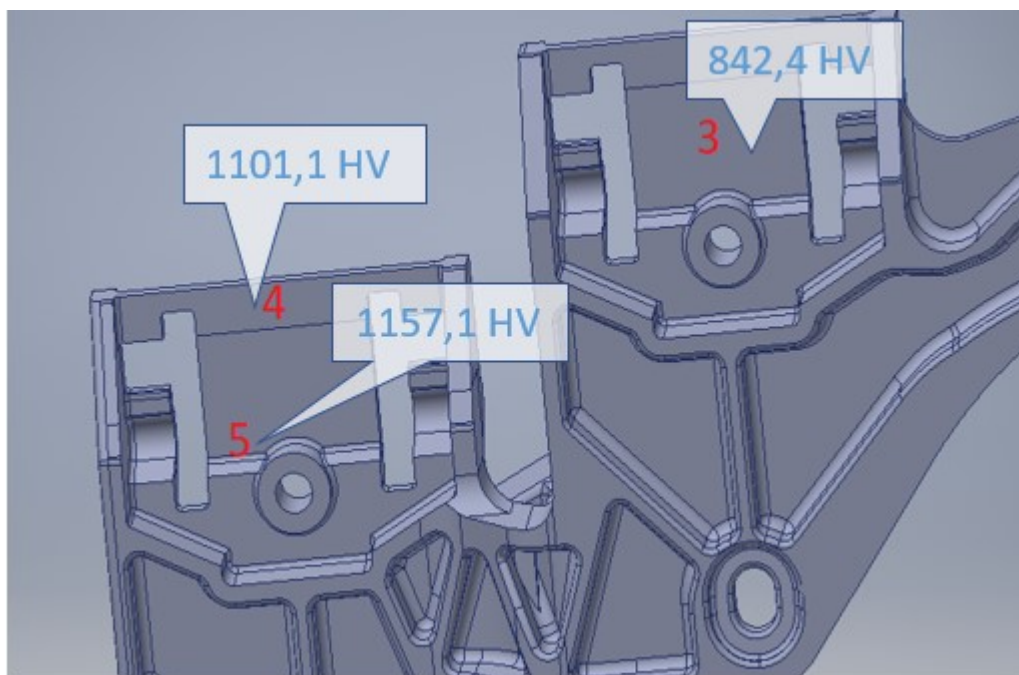
Obr. 27 Naměřené hodnoty tvrdosti na displeji Krautkramer MIC 20

1.7. Vytvoření mapy povrchové tvrdosti

Pro velký rozptyl naměřené tvrdosti bylo přistoupeno k ověření tvrdosti na jednotlivých místech rámečku světloometu. Tvrdost na vytipovaných místech byla měřena vždy 10x a v dostatečné vzdálenosti vpichů od sebe, aby nebyla měřená tvrdost ovlivněná deformací kolem místa vpichu po předchozím měření. Průměrné výsledky měření tvrdosti jsou zobrazeny na Obr. 28 a Obr. 29. Výsledky jsou vyznačeny barevně: Oranžově jsou označeny měření na tisknutém povrchu rámečku bez úpravy, zeleně plochy, kde byl povrch ručně přebroušen brusným papírem P600, a modře jsou označeny hodnoty změřené na obrobené ploše.



Obr. 28 Mapa povrchové tvrdosti tisknutého povrchu – pohled 1 a 2 (oranžové hodnoty po tisku, zeleně ručně přebroušeno, modře po obrobení)



Obr. 29 Mapa povrchové tvrdosti tisknutého povrchu – pohled 3

Z měření je patrné, že naměřené hodnoty tvrdosti značně kolísají. Vyskytly se i případy, kdy po obrobení byly hodnoty tvrdosti naměřené vyšší než před obrobením. Tyto naměřené hodnoty, nelze brát jako zcela korektní. Zpřesněním výsledků by se dalo dosáhnout dalším měřením na jiném měřicím přístroji.

5. Technologie obrábění, volba vhodných nástrojů a parametrů obrábění

Obecné poznatky, jako použití tepelných i kleštinových upínačů, stopkových fréz a fréz s vyměnitelnými destičkami, použité zařízení LITZ LU-800, svěrák Gressel Gripos, chladicí emulze Fusch ECOCOOL R-TN 2525-HP atd. zůstávají platné i pro frézování rámečku. V této kapitole budou popsány nové poznatky a zajímavosti specifické pro frézování rámečku světloometu. Problematiku obrábění rámečku světloometu lze shrnout do následujících bodů.

- Výběr nástrojů a parametrů obrábění
- Příprava CAM rámečku světloometu
- Obrábění rámečku světloometu

1.8. Výběr nástrojů a jejich parametrů pro obrábění rámečku světloometu

Materiál rámečku světloometu je žárupevná ocel EOS MaragingSteel MS1. Deklarovaná tvrdost rámečku měla být 35 HRC, avšak i přes nejednoznačné výsledky měření tvrdosti, které jsou uvedeny výše v kapitole „4.1. Vytvoření mapy povrchové tvrdosti“, se dalo předpokládat, že povrchová tvrdost mohla místy být až 50 HRC a s takovou tvrdostí bylo potřeba počítat při výběru vhodných nástrojů.

Zásadní změnou u obrábění rámečku světloometu bylo použití mikro frézování jako nejzákladnější technologií pro výrobu miniaturizovaných dílů a součástí [8]. S tím souvisí i užití mikro nástrojů, tedy nástrojů, jejichž průměr je menší než 3 mm. Pro tyto malé průměry nástrojů už nebylo možno upínat nástroje přímo do hlavního vřetene stroje, ale bylo používáno vysokootáčkové vřeteno Jäger.

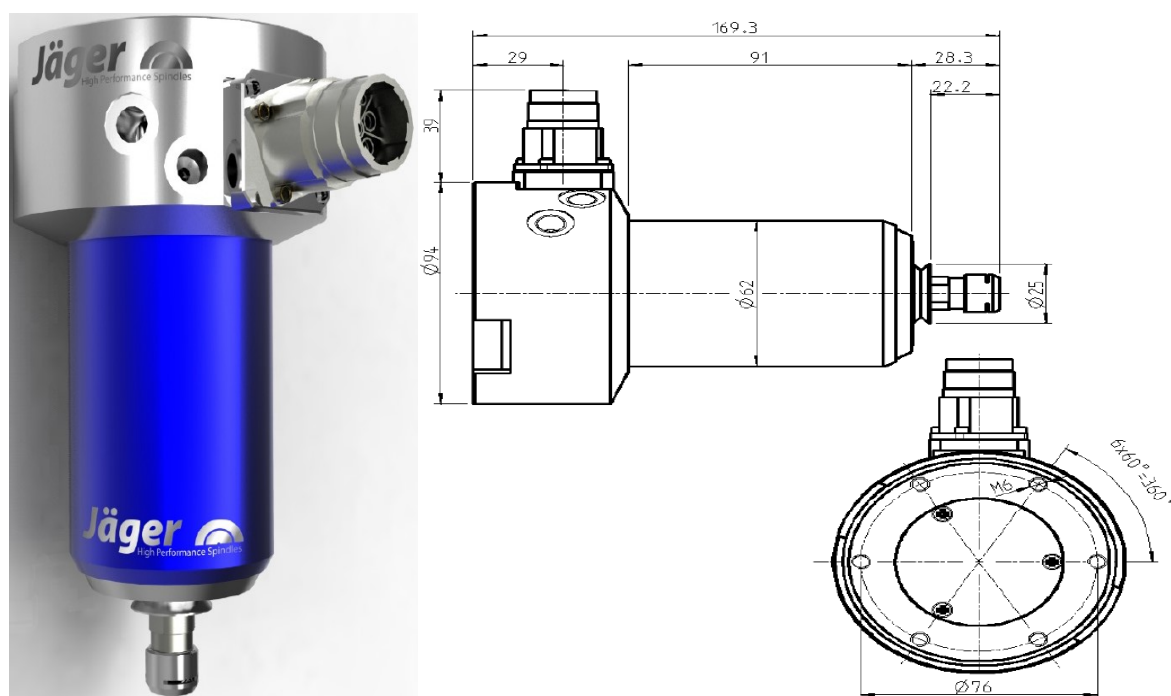
5.1.1. Vysokootáčkové vřeteno Jäger S62-M280.07 S5

Hlavní vřeteno stroje umožňuje maximální otáčky 12.000 ot/min. To pro velmi malé nástroje, v tomto případě až 0,5 mm, znamená nedostatečnou řeznou rychlost a z toho plynoucí špatnou jakost povrchu a také extrémně dlouhé časy obrábění. Vysokootáčkové vřeteno Jäger S62-M280.07 S5 umožňuje až 80.000 ot/min. Další parametry vřetene Jäger jsou uvedeny v Tab. .

Tab. 4 Základní parametry vysokootáčkového vřetene Jäger S62-M280.07 S5

Napájení vřetene	elektrické
Max. výkon vřetene	1,2 kW
Maximální otáčky vřetene	80.000 ot/min
Maximální napětí výstupní	81 V
Maximální proud vstupní	7A
Vstupní napájení	230 V
Upínací systém	ER 11
Upnutí do hlavního vřetene stroje	SK 40
Uložení vřetene	Hybridní keramická ložiska

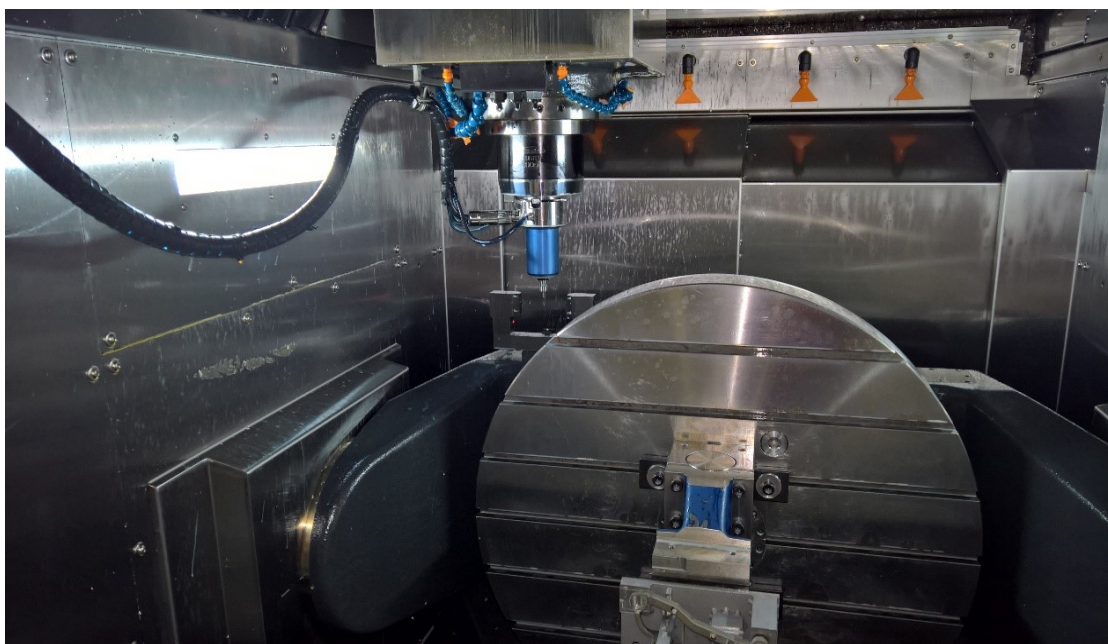
Obrábění vysokootáčkovým vřetenem byly vždy až poslední operace po konvenčním obrábění většími nástroji. Vysokootáčkové vřeteno se upínalo do hlavního vřetene stroje, které bylo potřeba zablokovat. Pro použití vysokootáčkového vřetene v hlavním vřeteni stroje byl upraven řídicí systém stroje LITZ LU-800, tak aby bylo obrábění maximálně bezpečné a celý proces obrábění mohl probíhat z hlavního panelu, stejně jako konvenční obrábění hlavním vřetenem. Jedinou nevýhodou při použití vysokootáčkového vřetene bylo, že již nelze používat žádné další upínače, a nástroje se upínají přímo do kleštiny vřetena. Proto bylo potřeba dobře navrhnout a simulovat CAM program, aby nedošlo ke kolizím stroje a celé vyložení nástroje mohlo být realizováno pouze délkou nástroje vyloženého v kleštině. Pohled na vřeteno se základními rozměry je na Obr. 30.



Obr. 30 Vřeteno Jäger S62-M280.07 S5

5.1.2. Výměna nástrojů - rychlovřeteno

Při použití rychlostního vřetena je velký rozdíl ve výměně nástrojů. Nástroje používané v klasickém vřetení jsou včetně upínačů předpřipravené v zásobníku nástrojů stroje, a ten je automaticky nabírá a používá, tak jak je naprogramováno. U použití mikronástrojů, ve vysokootáčkovém vřetení, to není možné. Tam je potřeba vždy generovat pouze sled operací stejným nástrojem. Nástroj se do kleštiny rychlovřetene upíná ručně a pak je pomocí laserové nástrojové sondy přesně změřena jeho délka a průměr. Měření probíhá přímo na stroji, po sklopení stolu o 90° a najetí na měřicí polohu, viz Obr. 31.



Obr. 31 Měření nástroje ve vysokorychlostním vřetenu

5.1.3. Použité nástroje a upínače

Pro frézování funkčních ploch rámečku světlometů, bylo potřeba použít širokou škálu nástrojů a upínačů. Ještě ve větší míře než u frézování upínacího přípravku se zde uplatnilo tepelné upínání dlouhých nástrojů. V Tab. a Tab. , jsou uvedeny všechny použité nástroje a upínače pro obrábění rámečku světlometu, včetně navržených řezných rychlostí. Mikro nástroje pod 3 mm již nejsou označovány jako krátké, střední a dlouhé, jako je tomu v kapitole „2.2.2. Nástroje a upínače pro obrábění přípravku na upnutí rámečku světlometu“, ale jejich délka je vázána na průměr. Jsou ucelené řady nástrojů, kdy délka nástroje je v násobku průměru a to např.: 3xD, 5xD, 8xD, 10xD, 12xD a 15xD. I zde platí zásada, že čím větší délka nástroje, tím nižší jsou obráběcí parametry a jakost plochy je horší. V Tab. jsou čísla nástrojů Txx stejná, jak byla použita v programu SolidCAM a jak byla umístěná v zásobníku stroje, který disponuje 32 pozicemi.

Tab. 5 Použití nástrojů pro obrábění rámečku světloometu upnutých v klasickém vřetení

Číslo nástroje	Použitý upínač	Použitý nástroj Břítové destičky	Počet zubů z	Posuv na zub f_z [mm/z]	Řezná rychlost v [m/min]
T6	Tepelný upínač, D8, A = 80 mm Tepelné prodloužení A = 60 mm	Válcová fréza D1,5 mm, 10xD, M5716.120	2	0,015	30
T7	Kleštinový upínač ER32, A = 60 mm Tepelné prodloužení A = 60 mm	Toroidní fréza D2,5 mm, r = 0,2 mm, 222403.2220	2	0,015	40
T8	Kleštinový upínač ER32, A = 60 mm	Válcová fréza D5 dlouhá	4	0,008	40
T9	Kleštinový upínač ER25, A = 100 mm	Válcová fréza D8, 0,15x15°, P15245.400	4	0,015	60
T21	Vrtákové CNC sklíčidlo, A = 105 mm	Vrták D3,5 HSSCo8	2	0,02	7
T22	Vrtákové CNC sklíčidlo, A = 105 mm	Vrták D3,6 HSSCo8	2	0,02	7
T23	Vrtákové CNC sklíčidlo, A = 105 mm	Vrták D5,2 HSSCo8	2	0,025	7
T26	Kleštinový upínač ER16, A = 60 mm	Válcová fréza D2, krátká, MasterCut	2	0,005	60
T29	Tepelný upínač, D8, A = 80 mm Tepelné prodloužení A = 60 mm	Kulová fréza, D2,5, r = 1,25 mm, 8xD, X6566.160	2	0,03	90

Pokud se podíváme na nástroje T6, T7, T29 tak i zde by se dalo hovořit o mikro nástrojích, kdy jejich průměr je pod cca 3 mm. Vzhledem k použitým řezným rychlostem (z důvodu velkého poměru L/D) mohly být použity ještě v klasickém vřetení stroje. Když přepočítáme řeznou rychlost dle vztahu:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d} \quad [m/min]$$

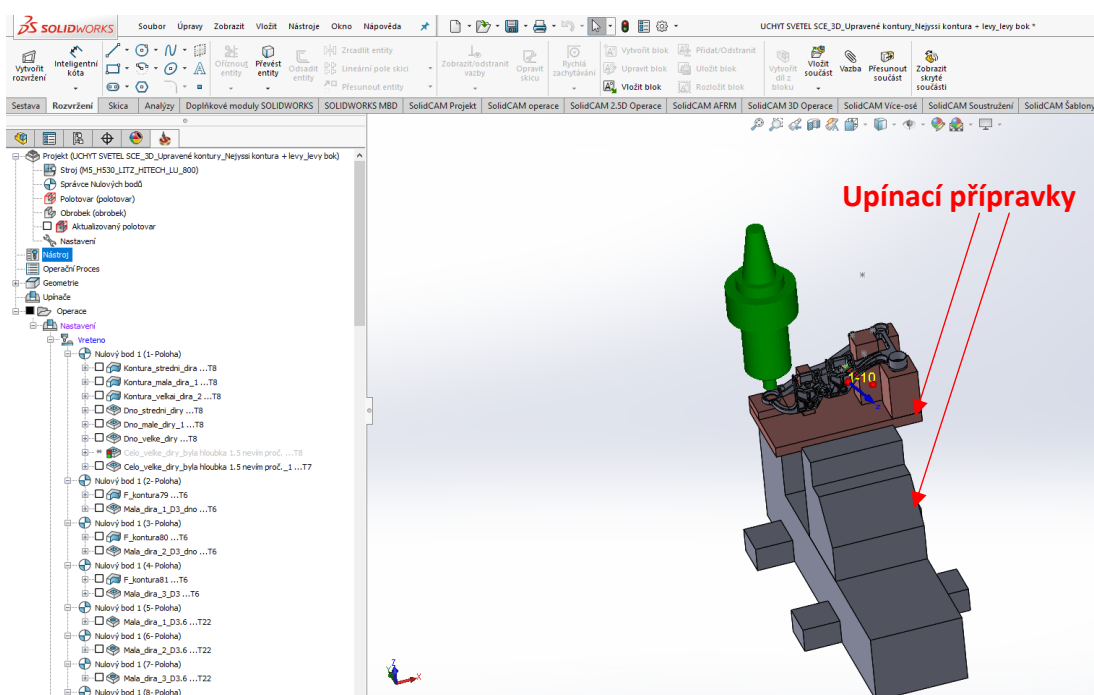
kde za průměr frézy dosadíme $d = 0,8$ mm, řeznou rychlost $v = 30$ m/min dostáváme potřebné otáčky 11936 ot/min. Bylo tedy možno použít klasické vřeteno s maximem 12.000 ot/min. Jiná situace je u nástrojů v Tab. . Zde už byl poměr L/D příznivější a bylo možno tedy navrhnout vyšší řezné podmínky a použít nástroje v rychlovřetenu. Nejvíce je to vidět na nástroji T204 – Kulová fréza D 0,5 mm, s poměrem L/D = 3. Zde pro použitou řeznou rychlost $v = 90$ m/min jsou otáčky vřetene $S = 57296$ ot/min. V tomto případě už je uplatnění vysokorychlostního vřetene zcela namístě.

Tab. 6 Použití nástrojů pro obrábění rámečku světlometu upnutých v rychlovřetenu Jäger

T203	Jäger S62-M280.07 S5, A = 169,3mm	Válcová D0,8 mm, 8xD, M5716.080	2	0,008	40
T204	Jäger S62-M280.07 S5, A = 169,3mm	Kulová fréza D0,5 mm, r = 0,25 mm, 3xD, M45785.050	2	0,012	90

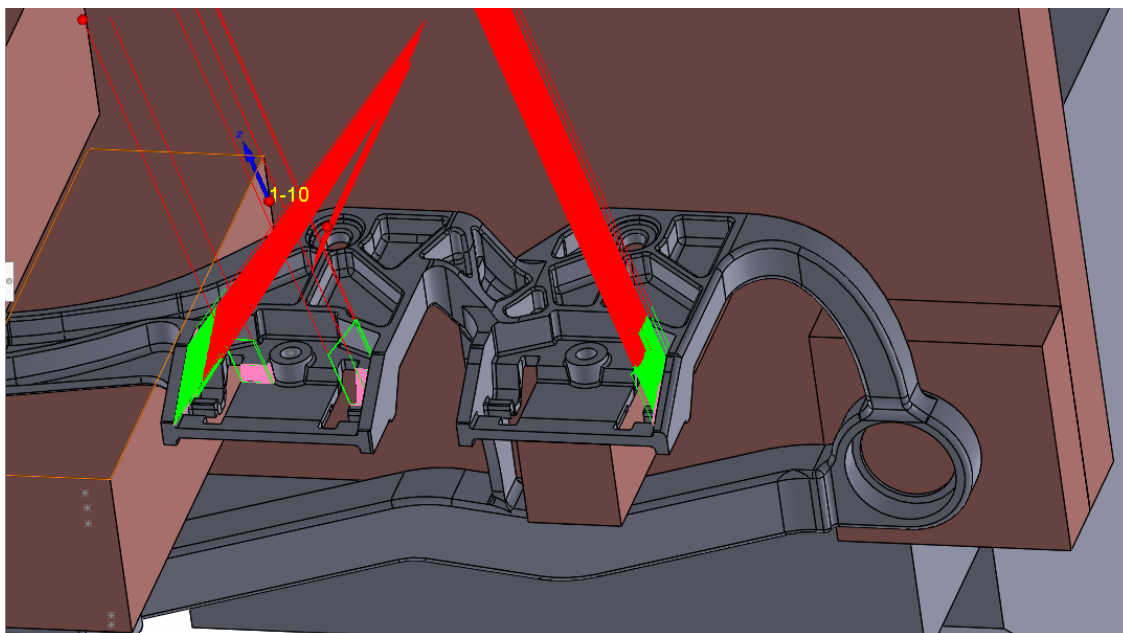
5.1.4. Příprava CAM rámečku světlometu

Pro přípravu programu obrábění byl i zde použit program SolidCAM 2017. Obdobně jako pro frézování přípravku pro uchycení rámečku světlometu, se vytvořila stromová struktura jednotlivých operací, které byly simulovány pomocí SolidVerify a Simulace stroje a na konci pomocí simulátoru NC-kódu Eureka 8.5. Co se však zásadně změnilo bylo, že přípravek pro uchycení světlometu, detailně popsán v kapitole „2. Přípravek pro upnutí rámečku na frézovací centrum“, již nebyl v SolidCAMu definován jako obráběný díl, ale byl to upínací přípravek – součást svěráku Gressel Gripos, viz následující Obr. 32. Pro simulace frézování mikro nástroji bylo potřeba SolidCAM doplnit o 3D model rychlovřetene Jäger.



Obr. 32 Náhled SolidCAM včetně upínání a stromové struktury programu

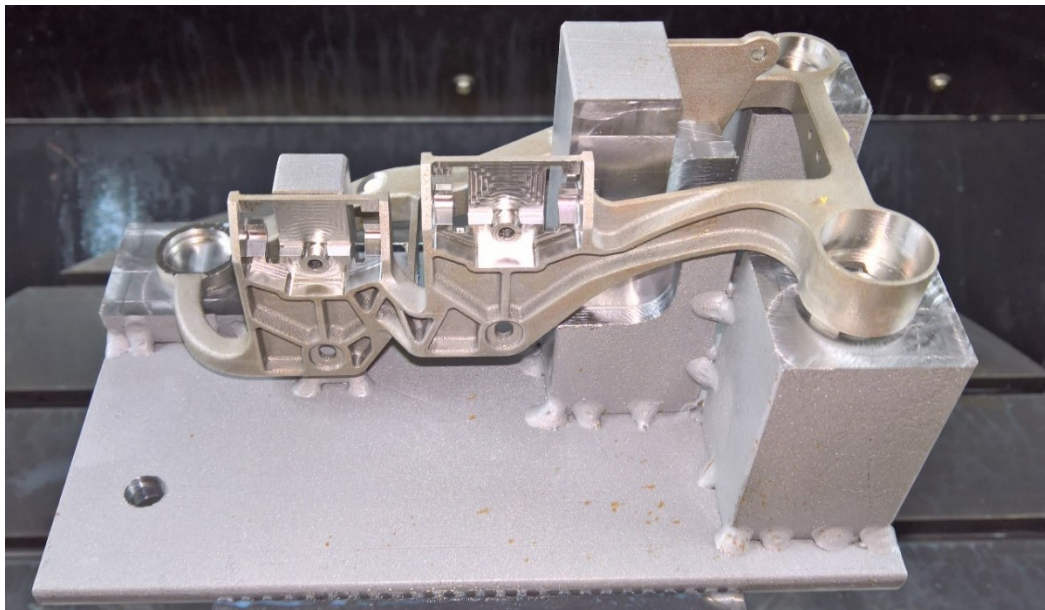
Obrobení funkčních ploch rámečku bylo poměrně složitou záležitostí. Po obrobení malých rádiusů, hlubokých kapes a kontur, se v plné míře využívaly více osé operace. Typickými příklady komplikovaně dostupných míst jsou malé rádiusy $r = 0,5 \text{ mm}$ na „kolíbkách“ pro světlomet, viz Obr. 33, ale i mnohé další. Složitost obrobění tohoto dílu dokládá, že bylo potřeba navrhnout celkem 71 dílčích operací.



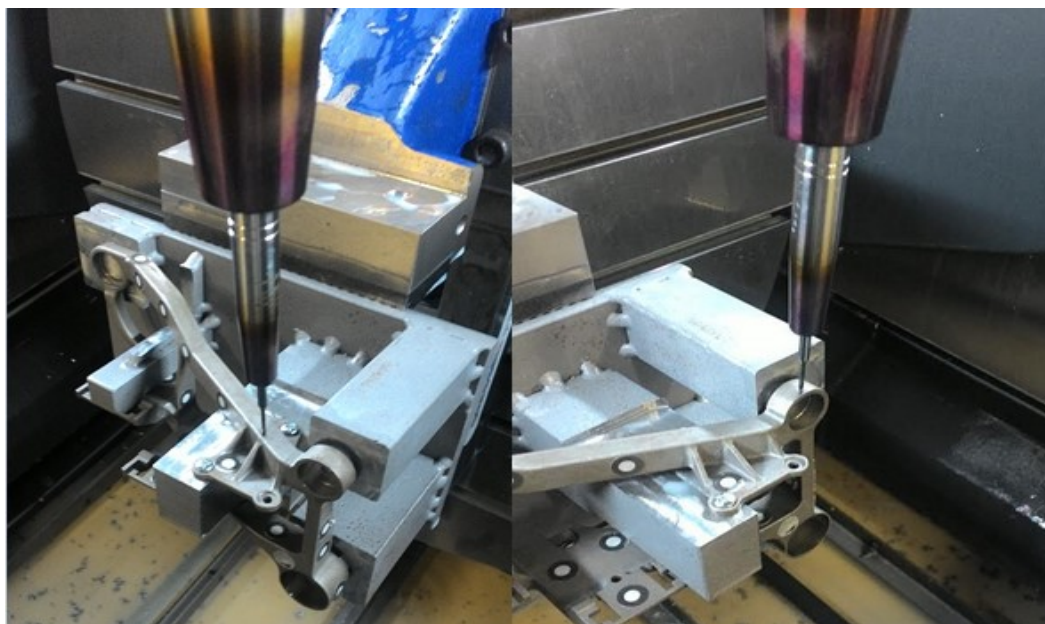
Obr. 33 Detailní pohled na dráhy SolidCAM pro kolíbkou pro světlomet.

1.9. Obrábění rámečku světlometu a zhodnocení výsledků

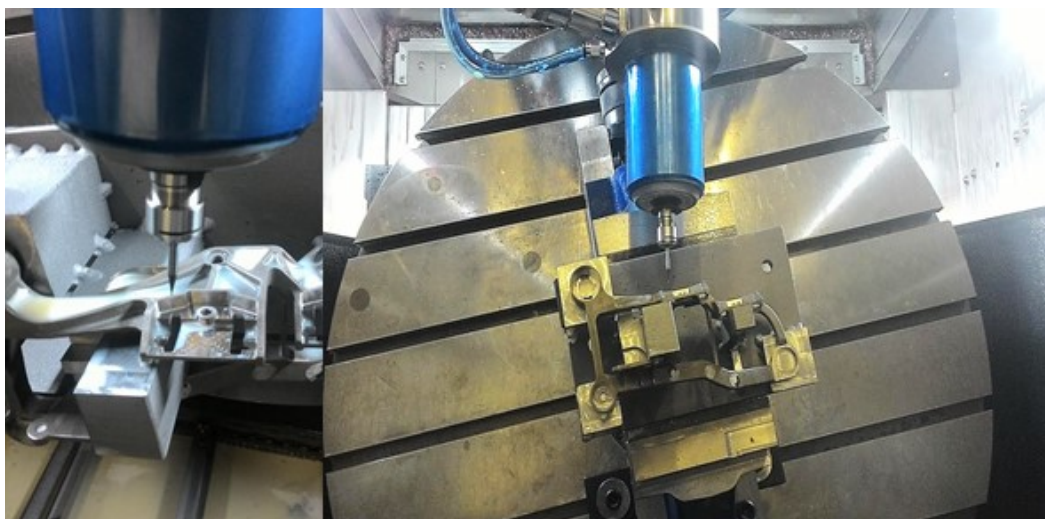
Rámeček světlometu byl obráběn na frézovacím centru LITZ LU-800. Obrobení proběhlo pomocí 2 upnutí. Pokaždé v jednom ze dvou upínacích přípravků navržených pro upnutí rámečku, viz příklady obrábění na Obr. 34 - Obr. 36. Dle navrženého programu v SolidCAMu se postupně obráběly definované funkční plochy a to jak pomocí nástrojů v hlavním vřetenu, tak i v rychlovřetenu.



Obr. 34 Upnutí rámečku světlometu na přípravek



Obr. 35 Příklad obrábění nástroji v hlavním vřeteni stroje – prodloužený tepelný upínač s frézou D 1,5 mm, M5716.120

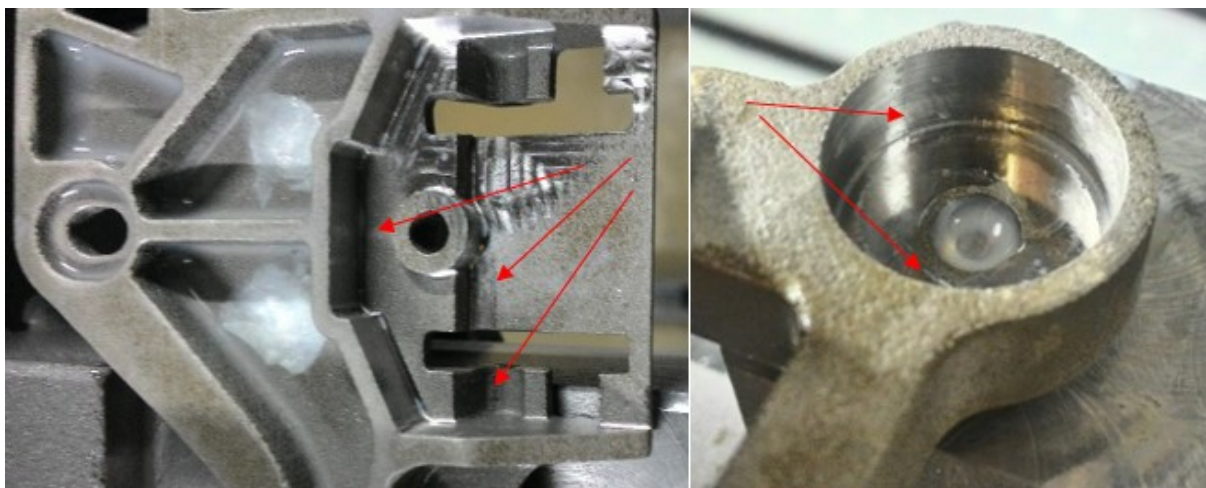


Obr. 36 Příklad obrábění rámečku vysokorychlostním vřetenem kulovou frézou D 0,5 mm, M45785.050

Celkový strojní čas potřebný pro obrobení rámečku z oceli EOS MaragingSteel MS1 (X3NiCoMoTi 18-9-5) je 7h:28m. Tento čas je čistě čas strojního obrábění. Taková dlouhá doba je způsobena velkou komplikovaností frézovaného dílu, charakterem materiálu a parametry obrábění ovlivněnými tvrdostí povrchové vrstvy.

5.1.1. Nedofrézované plochy a poškození nástrojů

Při obrábění rámečku světlometu se zjistilo, že některé plochy nejsou zcela obrobeny, viz příklady na Obr. 37, apod. Bylo potřeba najít kompromis mezi zachováním požadovaného rozměru, jeho výrobní tolerancí a kompletním obrobením jednotlivých ploch. Proto se postupně prováděly v SolidCAMu úpravy tvaru, kdy se vybrané kontury a plochy odsazovaly o 0,02 mm. Po úpravě odsazení, se generovaly pouze vybrané operace a provedla se kontrola obrobením. V případě potřeby se tento postup několikrát opakoval. Tento postup byl značně zdlouhavý, ale pokud by se rámeček světlometu vyjmul ze stroje na přeměření, vnesená nepřesnost při jeho novém upnutí by byla vyšší a opakovaně obráběné plochy by na sebe nenavazovaly. Největší problém by byl u použití mikro nástrojů, kde je hloubka obráběné třísky $a_p = 0,01$ mm. Zde bylo potřeba setinu po setině odebírat vrstvy materiálu.

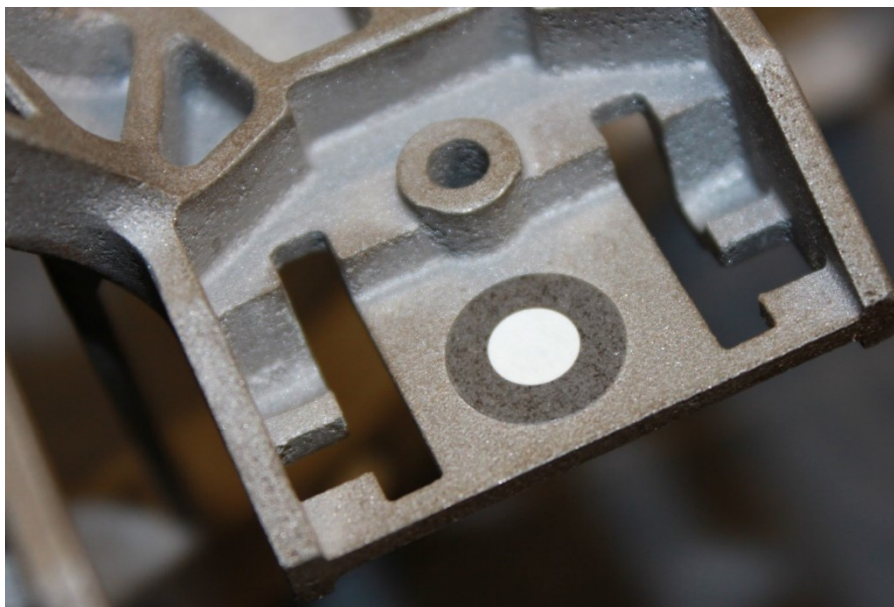


Obr. 37 Příklad nedofrézovaných ploch

Tak jak byly neodfrézované oblasti, tak byly i oblasti, kde bylo materiálu oproti modelu více. To způsobilo poškození a zlomení mikro nástroje. Bohužel, při použití nástroje o průměru 0,5 mm, a chlazení emulzí, není možno toto poškození odhalit v průběhu obráběcí operace. Břit otáčejícího se nástroje není pod chladicí emulzí vidět a zvukový projev frézování tímto nástrojem je přehlušen chodem samotného stroje. Proto byla po každé operaci provedena kontrola břitu nástroje. Jakmile byl tento problém detekován, probíhalo obrábění v kritických místech s odsazením a postupně se v hladinách postupovalo až na požadovaný rozměr, což opět násobně prodlužovalo strojní čas.

6. Měření drsnosti

Struktura povrchu 3D tisku rámečku světlometu je podobná licí struktuře. I pouhým okem jsou patrné nedokonalosti povrchu, viz Obr. 38.



Obr. 38 Jakost povrchu po tisku a grafické znázornění nerovnosti

1.10. Měření drsnosti tisknutého rámečku před a po opracování

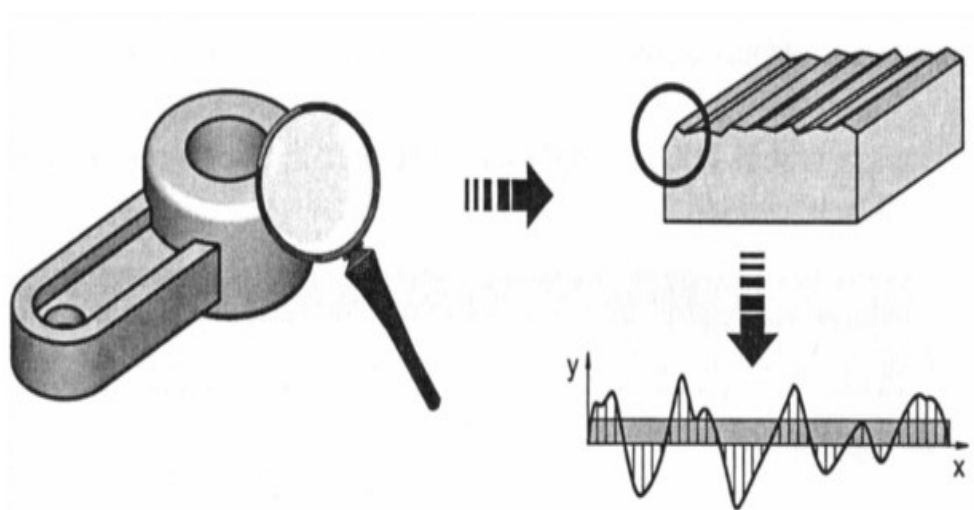
Základním měřením pro posuzování kvality plochy je měření její drsnosti. Žádný povrch není ideálně rovný a hladký, vždy má nějaké nepřesnosti. Drsností rozumíme soubor veškerých nerovností povrchu (v mikrometrickém měřítku) vzniklých při výrobě nebo vlivem výroby. Náhodné nepravidelné nerovnosti (trhlínky, důlky), vady materiálu ani poškození povrchu se do této definice nezahrnují. Měření drsnosti je měření výšky vrcholů a prohlubní od středního rozměru v mikroskopickém měřítku, viz Obr. 39. Nejužívanější hodnotou v praxi je hodnota R_a , což je střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek od střední čáry profilu v rozsahu základní délky. Tato hodnota se dá spočítat pomocí dvou níže uvedených vzorců.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

nebo přibližně

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(x_i)|$$

l – základní délka, n – počet vybraných bodů měřeného profilu, $y(x_i)$ – hodnota vybraného bodu.



Obr. 39 Drsnost povrchu [9]

Faktory ovlivňující jakost povrchu:

- Minimalizace vyložení nástroje
- Nepoškozené a čisté držáky nástrojů
- Zlepšené upínání obrobku
- Stabilita upínacího nástroje a jeho vlastnosti
- Volba optimálních řezných dat
- Analýza opotřebení nástroje pro dosažení co nejlepšího řezného procesu [10]

6.1.1. Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ - 411

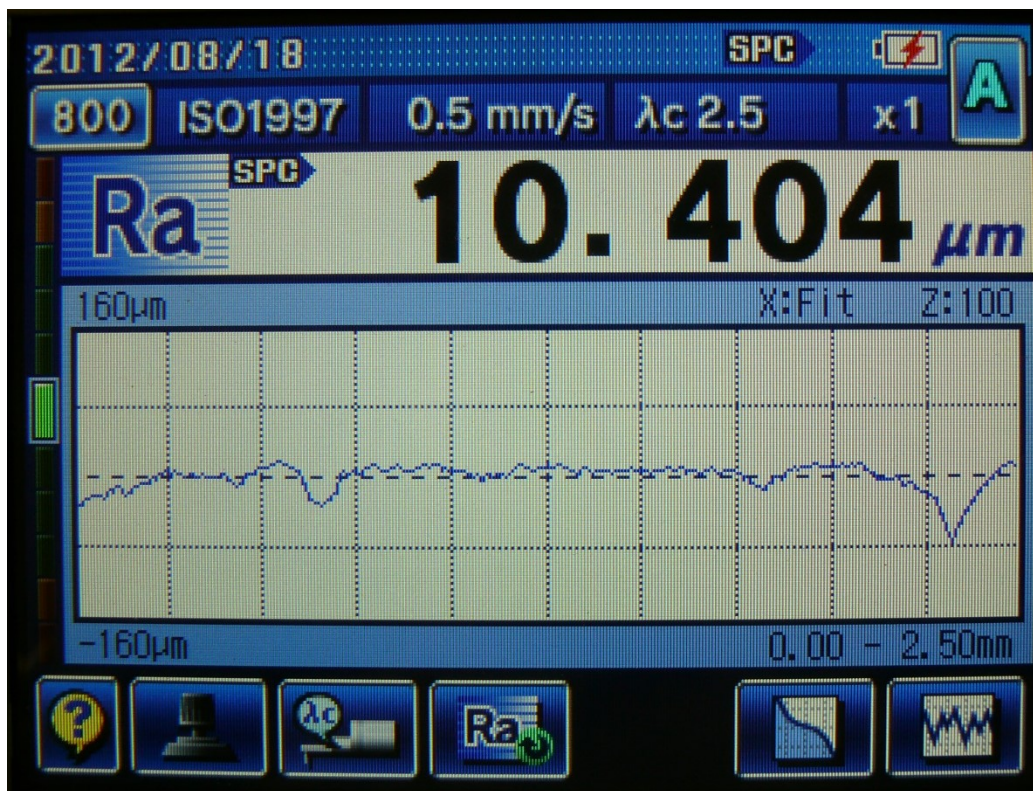
Pro měření drsnosti byl zvolen drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ – 411, viz Obr. 40 a to zejména z důvodu:

- Přenosný drsnoměr – můžeme měřit drsnost i přímo při procesu obrábění, bez přepnutí obrobku
- Možnost nastavení dráhy měření po 0,01 mm – vhodné pro měření malých plošek
- Vysoká přesnost - rozlišení snímače až 0,000125 μm
- Možnost výměny měřicích hrotů – pro měření v úzkých mezerách a jiných obtížně přístupných plochách
- Grafické zobrazení měřeného profilu
- Měření R_a , R_q , R_y , $R_{z\text{max}}$, vlnitosti a dalších.
- Možnost měření a vyhodnocení drsnosti dle norem DIN, EN ISO, ANSI a dalších
- Záznam a tisk provedených měření
- Vysoká přesnost a opakovatelnost měření za použití měřicího stojanu
- Možnosti různých statických metod zpracování
- Absolutní snímač, bez kluzné patky
- Měření a kompenzace tvaru profilu



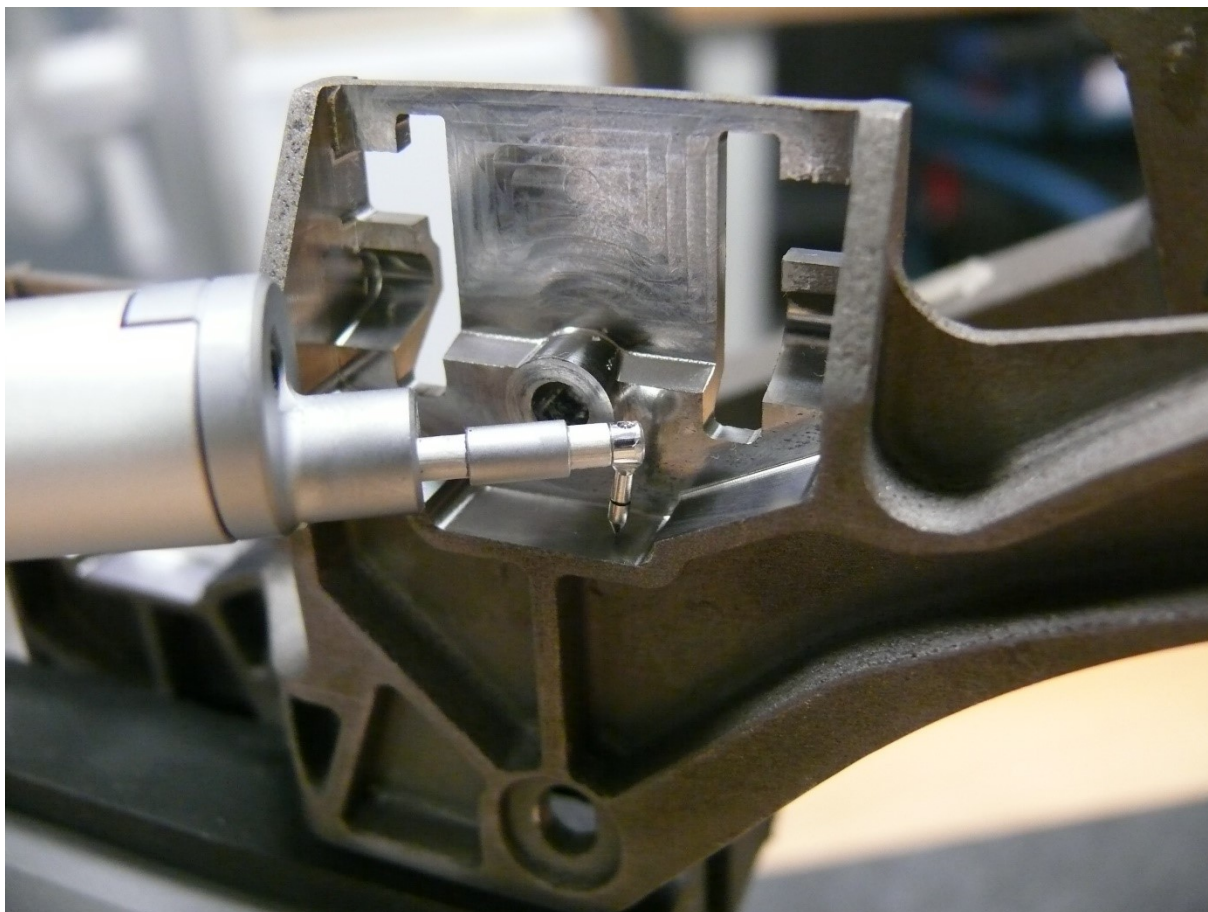
Obr. 40 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ – 411

Na vytisknutém rámečku světlometu byla měřena drsnost povrchu, viz Obr. 40. Křivka tvaru povrchu s naměřenou drsností je na Obr. 41. V každé vytipované oblasti byla tvrdost měřena vždy 5x.

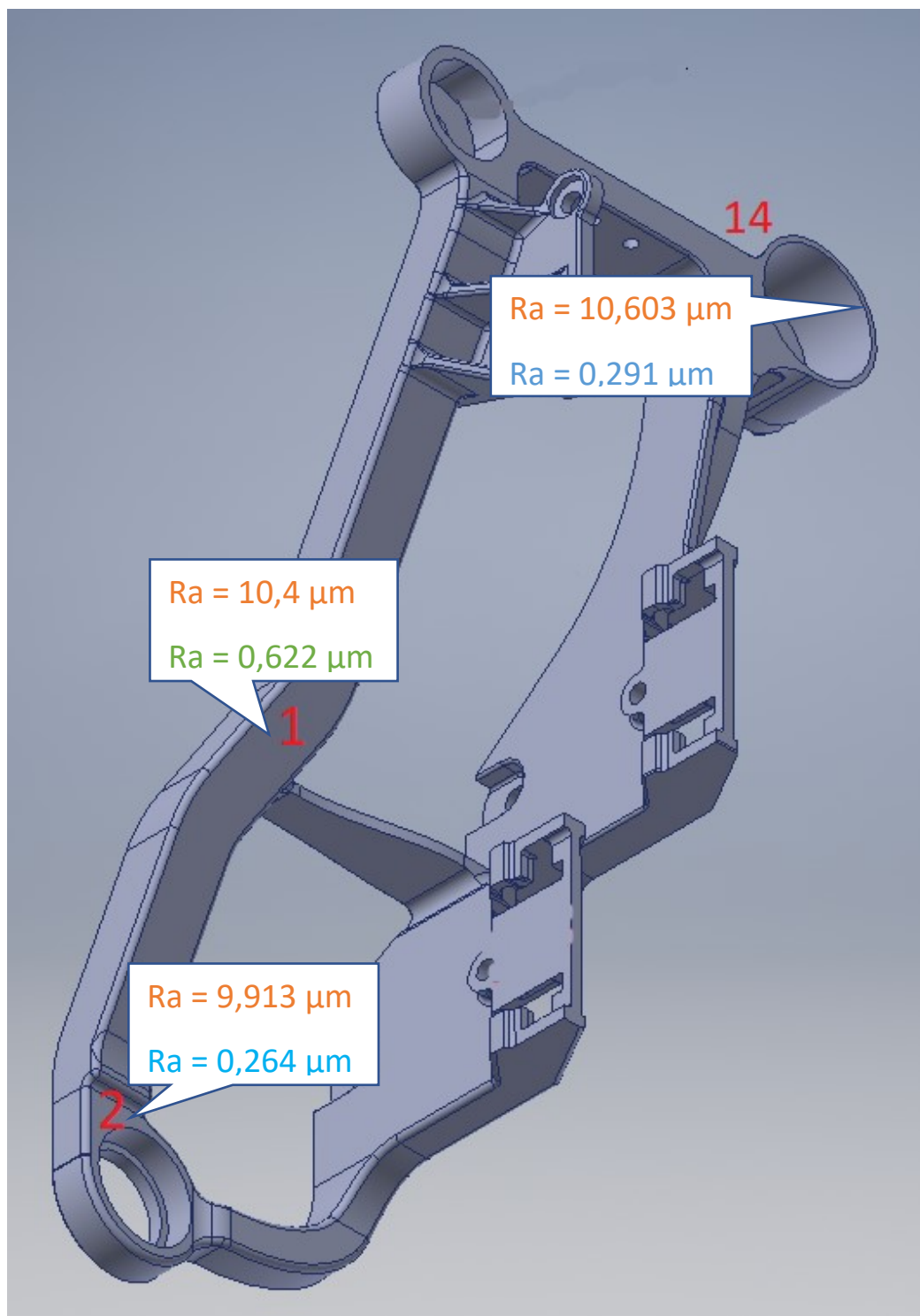


Obr. 41 Křivka tvaru povrchu rámečku světlometu – pohled na displej přístroje

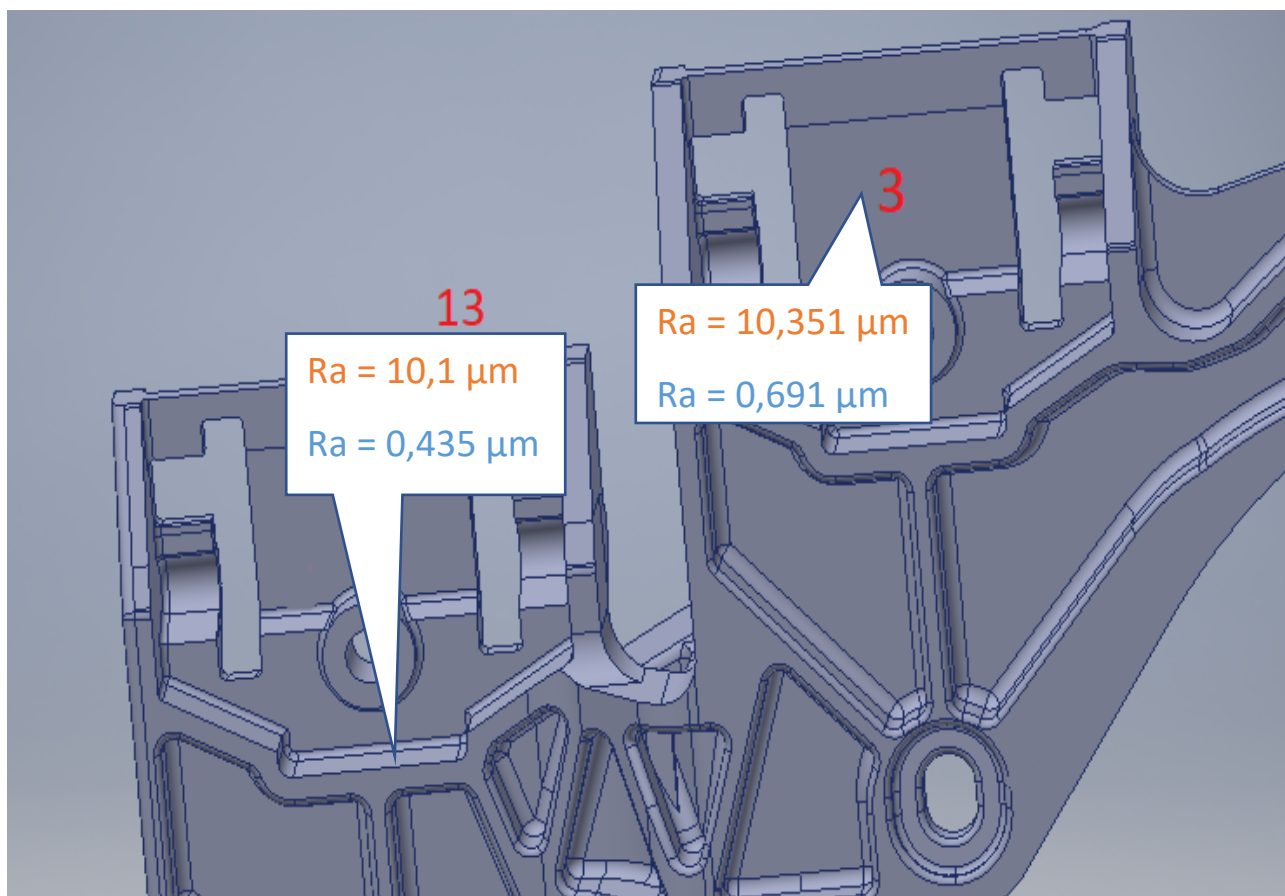
Měření drsnosti se provedlo na funkčních plochách, příklad na Obr. 42, a to před i po obrábění. Tam, kde nebylo obráběno, se strojní obrábění nahradilo ručním přebroušením plochy brusným papírem zrnitosti P600. Výsledkem je mapa měřených tvrdostí, viz Obr. 43 a Obr. 44. Oproti měření tvrdosti, výsledky odpovídají předpokladům. Čím lepší metoda opracování, tím klesá hodnota drsnosti povrchu (bez opracování – ručně přebroušeno – strojně obrobeno).



Obr. 42 Příklad měření drsnosti na tisknutém 3D rámečku



Obr. 43 Mapa naměřených drsnosti – pohled 1 (oranžové hodnoty po tisku, zeleně ručně přebroušeno, modře po obrobení)



Obr. 44 Mapa naměřených drsnosti – pohled 2 (oranžově po tisku, modře po obrobení)

7. Závěr

Tato práce se věnuje obrábění rámečku světlometu a zhotovení pomocných přípravků pro jeho upnutí.

Obrábění je jedním z nezastupitelných článků pro moderní aditivní technologie. Komplexnost toho odvětví strojírenství skloubí dohromady několik samostatných oborů jako například programování, konstrukce dílů, jejich analýzu atd. Obráběním na víceosých strojích můžeme snadno kompletně vyrábět nové díly, přesně dokončovat plochy z polotovarů vyrobených jinou technologií nebo tyto díly kontaktně skenovat a hodnotit jejich jakost.

Aditivní technologie mají velký přínos pro optimalizované a složité tvary. Tyto tvary nelze obrábět konvenčními stroji a nástroji, ale vyžadují specifický přístup jak z pohledu dlouhých nástrojů, dlouhých upínačů, ale také vysokého upnutí obrobku, aby bylo možno na plno využívat potenciálu víceosého obrábění.

Pro potřeby obrábění rámečku světlometu byly navrženy a vyrobeny upínací přípravky, definovány obráběcí nástroje a určeny jejich řezné parametry. Tyto poznatky, stejně tak jako připravené CAM programy jsou použitelné pro frézování dalších dílů.

Při návrhu CAM projektu a následném obrábění se prokázala výhoda použití tepelného upínání a dalších 2 rotačních os obráběcího stroje LITZ LU-800, kdy bylo možno minimalizovat počet upnutí a obrábět těžko přístupná místa při zachování vysoké přesnosti obrábění.

Pro frézování dílů světlometu (přípravky pro obrábění, funkční plochy rámečku světlometu, přípravky pro dynamické testování) byly vybrány vhodné nástroje, ke kterým byly zvoleny řezné podmínky, jež byly upravovány a optimalizovány při procesu obrábění. Tyto upravené řezné podmínky, byly zpět přeneseny do projektu SolidCAM.

Výstupem této práce je optimalizovaný CAM projekt frézování funkčních ploch rámečku světlometu s nastavenými operacemi, podle kterých lze obrábět stejné, popř. zrcadlové díly. I přes problémy s přídávky na obráběných plochách, je tento program kompletní a ihned použitelný pro další obrábění. Po drobných úpravách jej lze použít na jiné přídávky obrábění, případně i pro jiné frézované materiály. Změnou materiálu a snížením povrchové tvrdosti, je možno obráběcí čas cca 7,5h značně redukovat. Např. řezné rychlosti pro hliníkové slitiny se pohybují až do 400 m/min, proti cca 30-80 m/min pro tvrdé žárupevné materiály.

Problémem při realizaci byly nedofrézované plochy, a naopak přebývající materiál oproti CAD modelu. Řešení pro nedofrézované plochy je zvětšit přídavky na obrábění. To však povede k delším strojním časům zejména u operací s mikro nástroji. U klasických nástrojů přídavky v řádu desetin mm nehrají zásadní roli. Tam, kde materiál přebýval, je problém komplikovanější. Je potřeba zjistit přesnou příčinu tohoto problému. Zda se jedná o nepřesný model, o nepřesnost tisku, deformace při tisku nebo deformace při následném tepelném zpracování. Při úpravě projektu SolidCAMu je možno všechny potřebné plochy odsadit na přídavky, nechat frézovat mikro nástroji na několik vrstev s tím, že některé vrstvy bude nástroj pravděpodobně frézovat naprázdno, nebo zpřesnit výchozí model polotovaru, např. 3D scanováním a frézovat v hladinách jen ty plochy, kde to je nezbytně potřeba.

Jako vstupní parametr pro návrh řezných podmínek byla na vstupním kovovém rámečku z oceli EOS MaragingSteel MS1 měřena povrchová tvrdost. Byl zjištěn vysoký rozptyl měřené tvrdosti (370,2 HV – 1105 HV). Ten může být způsoben nehomogenitou a póry v tisknutém materiálu, které by zásadně ovlivňovalo princip měření pomocí ultrazvukové sondy. V sondě ultrazvukového tvrdoměru kmitá v axiálním směru tyčinka s Vickersovým hrotem. Po vtlačení hrotu do materiálu, se změní frekvence kmitání. Změna závisí na ploše vpichu (tvrdosti) a modulu pružnosti materiálu. Toto může být ovlivněno případnými póry v materiálu. Bylo by vhodné ověřit mechanické vlastnosti materiálu na tvrdoměru s optickým vyhodnocováním Vickersova vpichu a to nejen na povrchu, ale i uvnitř tisknuté součásti. Rovněž by se měla provést strukturní analýza a definovat pórovitost tisknutého materiálu.

Na rámečku světlometu po tisku byla změřena drsnosti povrchu cca Ra 10. Hodnota drsnosti strojně obrobeného povrchu se pohybovala do cca Ra 0,3, což je na proces frézování optimální hodnota. Prokázalo, se že i po 3D tisku polotovaru z kovového prášku je možné tento obrobít na vysokou jakost povrchu.

Citovaná literatura

- [1] BRYCHTA, Josef. Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3522-8.
- [2] ŠTULPA, Miroslav. CNC obráběcí stroje a jejich programování, 1. vydání, BEN-technická literatura, Praha 2006, ISBN 80-7300-207-8
- [3] BENEŠ, Ondřej. Vývoj a konstrukce modelové frézy z HSS oceli. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [4] [Online] Projekt: 1.5, Registrační číslo: CZ.1.07/1.5.00/34.0304 [Citace: 15.4.2018] <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=39658&revision=-1&instance=2>
- [5] MIKULOVÁ, Michaela. Frézovací stroje současné produkce. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [6] Robert-Stirling-Ring. *EOS MaragingSteel MSI*. [www.eos.info] Mnichov : EOS, 2016.
- [7] [Online] EOS. [Citace:8.2.2018] <https://www.3trpd.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/maraging-steel-1-2709-2012.pdf>.
- [8] GRZESIK, Wit. *Advancet machining processes of metallic materials*. First edition 2008. ©2008 Elsevier BV ISBN: 978-0-08-044536-2
- [9] GAJDOŠÍK, David. Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210. České Budějovice, 2013. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Pedagogická fakulta. Katedra aplikované fyziky a techniky.
- [10] SANDVIKEN: Sandvik Coromant, Produktivní obrábění kovů. © 1997, S-811 81, 300 s.